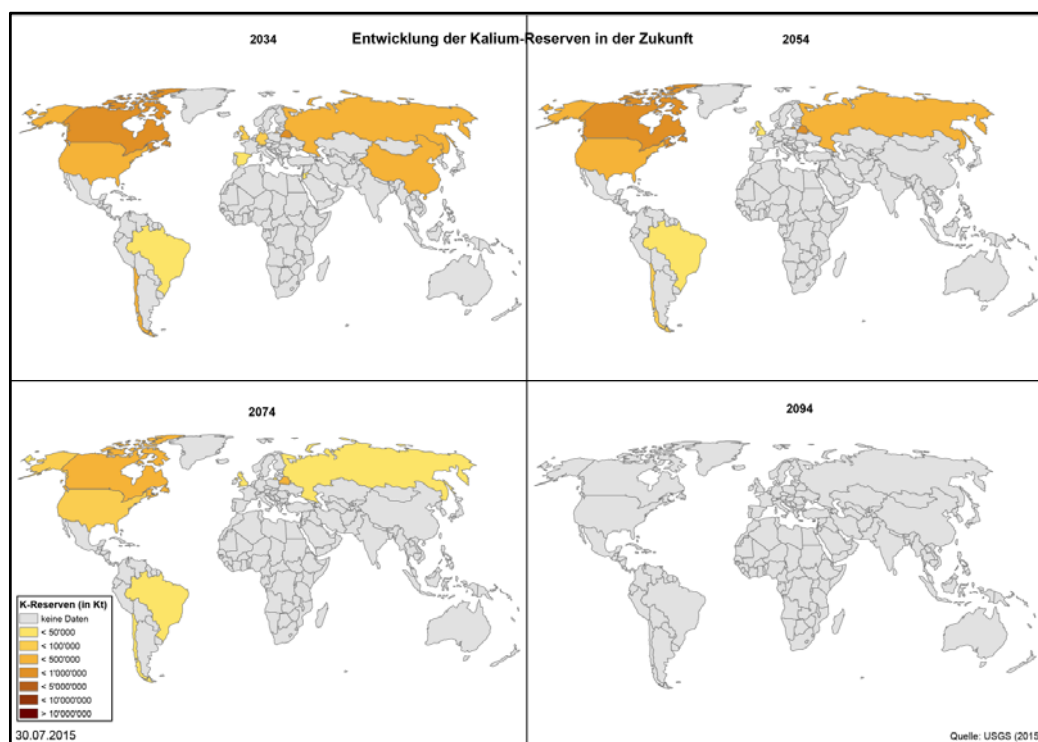


ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN  
DEPARTEMENT LIFE SCIENCE UND FACILITY MANAGEMENT  
INSTITUT UNR

**Auswirkungen und Risiken der Produktion mineralischer Dünger:  
eine kartographische Auseinandersetzung**



**Bachelorarbeit**

**Ennio Mariani**

Bachelorstudiengang 2010

Abgabedatum: 03.09.2015

Studiengang Umweltingenieurwesen

Fachkorrektorinnen:

Isabel Jaisli, Forschungsgruppe Geography of Food

Sabine Stauffacher, Forschungsgruppe Geography of Food

**Schlagworte (keywords)**

NPK-Dünger, NPK-Düngemittel, kartographische Darstellung, Ressourcen-Karte, Phosphor-Reserven, Kalium-Reserven, Haber-Bosch-Verfahren, Phosphorgips, Pottasche Umweltbelastungen

**Zitiervorschlag**

Mariani, E. Auswirkungen und Risiken der Produktion mineralischer Dünger: eine kartographische Auseinandersetzung. Wädenswil: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW. Unveröffentlicht.

**Adresse des Instituts**

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen

Sekretariat

Grüental, Postfach

CH-8820 Wädenswil

## Abstract

In order to maintain or increase the global food supply, the plant nutrients in the agricultural soils, extracted by harvesting, need to be replaced. The nutrient elements can then return to the soil through organic or mineral fertilizer. Today an estimated half of the food of the world's population is produced with the aid of mineral fertilizers. NPK fertilizers are regarded as the most important among them. They mainly consist of the macronutrients nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K).

Based on a literature research this bachelor thesis examines the risks and effects of the production of NPK fertilizers and visualizes the results in the form of maps. The future availability of reserves is among the most important risks in the production of P and K fertilizers. The main risk in the production of N fertilizers lies in the high energy consumption generated in the process. While there are no direct environmental impacts documented for N, there are several documented cases of local environmental damage for P and K.

The results of this study indicate that the situation of the global K reserves should be classified as more critical than previously assumed. Since the P reserves were massively revised upward in 2011, the outlook for this resource is more positive than in the past. In the near future the largest reserves of both elements will be spread among fewer countries, thus making all the others dependent on them even more. For the production of N fertilizers the high energy consumption is currently the only limiting factor. However, an increased scarcity of fossil fuels, expected in the near future, might lead to problems. The present thesis also demonstrates that predicting the life of a resource is always subject to considerable uncertainty.

A direct environmental impact could only be detected in the production of P and K fertilizers. The negative impact of P fertilizer production is mainly due to the improper storage and disposal of phosphogypsum. The latter is generated in the processing of P and is often contaminated with radionuclides and heavy metals. The production of K fertilizers generates large amounts of highly saline wastewater. Their untreated disposal into waters has already led to environmental damage.

This work concludes that global agriculture should replace the NPK fertilizers by alternative sources of nutrients as soon as possible. The main reason being the coming scarcity of natural resources resulting in an increase in prices which will deny the poorer farmers access to NPK fertilizers.

## Zusammenfassung

Um die globale Nahrungsversorgung aufrechtzuerhalten oder zu steigern müssen die durch die Ernte entzogenen Nährstoffe in den Landwirtschaftsböden wieder ersetzt werden. Die Nährelemente können durch organische oder mineralische Düngemittel wieder in den Boden gelangen. Heute wird geschätzt, dass mit mineralischen Düngern ungefähr die Hälfte der Nahrungsmittel der Weltbevölkerung produziert wird. Als wichtigste Dünger gelten die NPK-Düngemittel, die vor allem die Makronährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) beinhalten.

Die vorliegende Bachelorarbeit untersucht anhand einer Literaturrecherche die Risiken und Auswirkungen der Produktion von NPK-Düngern und visualisiert sie in Form von Karten. Zu den wichtigsten Risiken gehört bei der Produktion von Phosphor- und Kaliumdüngemitteln die Verfügbarkeit der Reserven, bei Stickstoffdüngern der hohe Energieverbrauch bei der Herstellung. Während bei N keine direkten Umweltauswirkungen dokumentiert sind, liegen für P und K diverse belegte Fälle von lokalen Umweltschäden vor.

Die Ergebnisse der Studie zeigen auf, dass die Situation der globalen K-Reserven kritischer eingestuft werden muss als bisher angenommen. Da die P-Reserven im Jahr 2011 massiv nach oben korrigiert wurden, stimmen die Prognosen für diese Ressource zuversichtlicher als auch schon. Die grössten Reserven beider Elemente werden in nächster Zukunft aber auf immer weniger Länder verteilt sein, was grosse Abhängigkeiten von diesen mit sich bringt. Für die Herstellung von Stickstoffdüngern ist der hohe Energieverbrauch momentan der einzige limitierende Faktor. Dies ist insofern problematisch, als dass in nächster Zeit mit der Verknappung fossiler Energieträger gerechnet werden muss. Grundsätzlich beweist die vorliegende Arbeit aber auch, dass Voraussagen bezüglich der Lebensdauer einer Ressource immer mit grossen Unsicherheiten verbunden sind.

Direkte Umweltauswirkungen konnten nur für die Produktion von Phosphor- und Kaliumdünger gefunden werden. Dabei handelt es sich bei der Herstellung von Phosphordünger hauptsächlich um die unsachgemässe Lagerung und Entsorgung von Phosphorgips. Dieser entsteht bei der Weiterverarbeitung von Phosphor und ist oft durch Radionuklide und Schwermetalle belastet. Die Herstellung von Kaliumdünger generiert grosse Mengen an stark salzhaltigen Abwässern. Deren unbehandelte Entsorgung in Gewässer hat schon zu diversen Umweltschäden geführt.

Diese Arbeit kommt zum Schluss, dass die globale Landwirtschaft möglichst bald die NPK-Düngemittel durch alternative Nährstoffquellen ersetzen sollte. Dies vor allem darum, weil die Verknappung der natürlichen Ressourcen einen Preisanstieg zur Folge haben wird, der es ärmeren Bauern verunmöglicht, die genannten Düngemittel einzusetzen.

## Inhaltsverzeichnis

Begriffsdefinitionen .....	1
1 Einleitung .....	5
2 Historischer Exkurs .....	8
3 Material und Methoden .....	11
3.1 Material .....	11
3.2 Methoden .....	12
4 Ergebnisse .....	15
4.1 Dünger-Chemie zwischen Pflanze und Bergwerk.....	15
4.1.1 Stickstoffdünger-Herstellung.....	17
4.1.2 Phosphordünger-Herstellung.....	17
4.1.3 Kaliumdünger-Herstellung .....	18
4.2 Reserven.....	20
4.2.1 Stickstoff-Reserven.....	20
4.2.2 Phosphor-Reserven.....	21
4.2.3 Kalium-Reserven .....	27
4.3 Umweltbelastungen bei der Herstellung .....	31
4.3.1 Umweltauswirkungen bei der Stickstoffdünger-Produktion .....	31
4.3.2 Umweltauswirkungen bei der Phosphordünger- Produktion.....	31
4.3.3 Umweltauswirkungen bei der Kaliumdünger- Produktion .....	35
4.4 Energieverbrauch bei der Herstellung von NPK-Düngern .....	37
4.5 Karten-Recherche.....	39
4.6 Karten .....	50
5 Diskussion.....	59
5.1 Stickstoff-Diskussion.....	59
5.2 Phosphor-Diskussion .....	60

---

5.3	Kalium-Diskussion .....	62
5.4	Weitere Aspekte im Kontext.....	64
5.5	Karten-Diskussion.....	66
5.6	Schlussfolgerungen .....	71
5.7	Ausblick.....	72
6	Literaturverzeichnis .....	73

## Begriffsdefinitionen

### **Abraum**

Als Abraum wird das Gesteinsmaterial bezeichnet, das im Tagebau das Nutzmineral überlagert (Wikipedia.de, 2015a). Als Tagebau gilt der Bergbau, der Bodenschätze nahe an der Erdoberfläche gewinnt, ohne dabei Stollen zu graben (Wikipedia.de, 2015i). Da in der englischen Literatur, unabhängig davon, ob es sich um Abfälle von Tagebau oder Untertagebau handelt, der Begriff „tailings“ verwendet wird, wird für Abfälle aus dem Untertagebau in dieser Arbeit das Wort „Abfallerz“ verwendet.

### **Apatit**

Apatit bezeichnet eine Gruppe nicht näher bestimmter Minerale, die sich chemisch ähnlich sind (Wikipedia.de, 2015b). Phosphor wird hauptsächlich aus Fluorapatit  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F})]$  und Karbonat-Fluorapatit  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{F})]$  gewonnen (Scholz & Wellmer, 2013).

### **Aquifer**

Ein Aquifer ist eine Gesteinsschicht mit Hohlräumen, die für die Leitung von Grundwasser geeignet ist. Es wird als „Grundwasserleiter“ bezeichnet (Wikipedia.de, 2015e).

### **Erz**

Als Erz wird ein im Bergbau abgebautes Mineralgemenge bezeichnet (Wikipedia.de, 2015d). Es besteht aus demjenigen Mineral, das gefördert werden soll, sowie weiteren Mineralien, die oft als Abfälle übrig bleiben.

### **IFDC**

Das International Fertilizer Development Center (IFDC) ist eine öffentliche internationale Organisation, die von einem „Board of directors“ geleitet wird, das aus RepräsentantInnen verschiedener Länder zusammengesetzt ist. Sie unterstützt und berät weltweit Landwirtschaftsbetriebe in der Kommerzialisierung ihrer Produkte und fördert Dünger-Technologien sowie verbesserte Anbaumethoden (IFDC, 2015).

### **IPCC**

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wurde vom United Nations Environment Programme (UNEP) und der World Meteorological Organization (WMO) ins Leben gerufen. Es hat den Auftrag, die Welt über den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Diskussion über den Klimawandel zu informieren (IPCC, 2015).

## JORC

Abkürzung für „Joint Ore Reserve Committee“. Australischer Code zur Schätzung von mineralischen Reserven, der vor allem von westlichen Firmen verwendet wird (USGS, 2014).

## Leguminosen

Leguminosen ist der Begriff einer Pflanzenfamilie, die sich unter anderem dadurch auszeichnet, dass sie in ihren Wurzeln eine symbiotische Beziehung mit *Rhizobium*-Bakterien eingeht. Diese Bakterien können Luftstickstoff fixieren und ihn so für Pflanzen verfügbar machen (Stout, 1990).

## Lithosphäre

„Als Lithosphäre werden die Erdkruste und der oberste Teil des Erdmantels, der sogenannte lithosphärische Mantel, bezeichnet. Sie bildet die äusserste Hülle der festen Erde und besteht aus einzelnen Platten, die sich in Bewegung befinden“ (ZAMG, 2015).

## Makronährelemente

Die neun Makronährelemente der Pflanzen sind C, H, O, N, P, K, Ca, Mg und S. Sie werden Makronährelemente genannt, weil sie den grössten Teil der pflanzlichen Trockenmasse ausmachen. Kohlenstoff wird aus der Luft (CO<sub>2</sub>), H und O aus dem Bodenwasser (H<sub>2</sub>O) aufgenommen. Die restlichen Elemente werden über die Wurzeln aus der sie umgebenden Bodenlösung bezogen (Benton, 2012).

## Mineralische / Organische Dünger

Mineralische oder anorganische Dünger stammen, abgesehen von Stickstoff, aus Bergwerken. Die gewonnenen Mineralien werden üblicherweise mit intensiven chemischen Verfahren zu Düngemitteln verarbeitet (Wikipedia.de, 2015c). Organische Dünger unterscheiden sich darin, dass die darin enthaltenen Verbindungen Kohlenstoff (C) enthalten. Der Ursprung dieser Dünger ist meistens tierisch oder pflanzlich, sie können aber auch synthetisch hergestellt werden. Bekannte Beispiele organischer Düngemittel sind Kuhmist, Gülle, Hornspäne, Kompost und Klärschlamm (Wikipedia.de, 2015c).

In dieser Arbeit werden die Wörter Dünger und Düngemittel synonym mit mineralischem Dünger oder mineralischem Düngemittel verwendet, ausser es wird explizit organischer Dünger oder organische Düngemittel geschrieben.



## Naphtha

Naphtha ist eine Erdölfraktion. Als Erdölfraktionen werden die Produkte bezeichnet, die bei der Destillation von Erdöl entstehen. Naphtha ist reich an Cycloalkanen und entsteht aus Rohöl (Wikipedia.de, 2015f).

## NPK-Dünger

Die Elemente Stickstoff, Phosphor und Kalium stellen die Hauptbestandteile vieler mineralischer Dünger dar (Benton, 2012). Sie gelten als wichtigste Pflanzen-Nährelemente in der Nahrungsmittelproduktion (Manning, 2015). Aus diesem Grund wird oft von NPK-Düngern gesprochen.

Auf Düngersäcken werden P und K in ihren Oxid-Formen ( $P_2O_5$  und  $K_2O$ ) angeben, Stickstoff als reines N (Benton, 2012).

## Pottasche

Der Name Pottasche stammt aus der Zeit, in der Kalium aus der Asche von verbranntem Holz ausgewaschen wurde (Sutton et al., 2013). Heute wird der Begriff als Oberbegriff für verschiedene Kalium-Salze verwendet. Darunter fallen unter anderem Karbonate, Sulfate und Chlor-Verbindungen (Lottermoser, 2010).

## Reserven /Reserven-Basis und Ressourcen

Die Begriffe Reserven, Reserven-Basis und Ressourcen werden in der Literatur nicht immer synonym verwendet (Fixen & Johnston, 2012; Kauwenbergh, Stewart, & Mikkelsen, 2013; Scholz & Wellmer, 2013; USGS, 2014; Vaccari, Mew, Scholz, & Wellmer, 2014). In dieser Arbeit wird folgende, auch vom USGS verwendete Definition verwendet:

- Ressourcen
  - Der Begriff Ressourcen bezeichnet die Konzentration von natürlich bestehendem, festem, flüssigem oder gasförmigem Material in der Erdkruste in einer Form, in der es momentan oder in Zukunft möglich ist, es abzubauen (USGS, 2014).
- Reserven-Basis („reserve-base“)
  - Die Reserven-Basis beinhaltet die Reserven plus den Anteil der Ressourcen, der zum gegebenen Zeitpunkt nicht ökonomisch abbaubar ist, es in Zukunft aber sein könnte. Der Unterschied zum Begriff Ressourcen besteht darin, dass die Reserven-Basis definitiv gemessen und nicht geschätzt ist. Sie bildet die Grundlage für die Berechnungen der Reserven (Fixen & Johnston, 2012; USGS, 2014).

- Reserven
  - Reserven sind Teil der Reserven-Basis und können mit der heute verfügbaren Technologie ökonomisch verwertbar abgebaut werden (Scholz & Wellmer, 2013; USGS, 2014).

## **USGS**

Die wissenschaftliche Organisation „United States Geological Survey“ (USGS) stellt Informationen zu natürlichen Ressourcen zusammen (USGS, 2015b).

## **Radionuklid**

Als Radionuklide oder radioaktive Nuklide werden instabile und somit radioaktive Nuklide benannt. Nuklide sind Atome, die in der Zahl ihrer Protonen und Neutronen übereinstimmen (Wikipedia.de, 2015g, 2015h).

# 1 Einleitung

Im Zusammenhang einer globalen nachhaltigen Entwicklung fällt der Nahrungsmittelproduktion eine zentrale Rolle zu. Obwohl die Zahl hungernder Menschen in den letzten Jahren zurückgegangen ist, leidet heute noch ungefähr 11% der Weltbevölkerung an Hunger. Von diesen 800 Millionen Menschen lebt die grosse Mehrheit in „Entwicklungsländern“ (FAO, IFAD, & WFP, 2015). Hinzu kommt, dass die Weltbevölkerung im Jahr 2050 gemäss Schätzungen zwischen neun und elf Milliarden Menschen umfassen wird (UN: Department of Economic and Social Affairs, 2013).

Die abnehmende Fläche an landwirtschaftlich nutzbarem Land (Montgomery, 2007; Pimentel, 2006) wird zusätzlich durch den steigenden Milch- und Fleischkonsum eines Teils der Bevölkerung der Entwicklungsländer (IAASTD, 2009) und durch die Produktion von Biotreibstoffen (IAASTD, 2009) unter Druck gesetzt. Neben dieser grossen Herausforderung haben die menschlichen Aktivitäten zu einer Verringerung der Fähigkeit der Ökosysteme für das Bereitstellen von Nahrung, Trinkwasser und Wald, aber auch für Ökosystem-Dienstleistungen wie Klima und Luftqualität geführt (Ramankutty, Evan, Monfreda, & Foley, 2008). Es geht um nachhaltige Entwicklung im Sinne der Definition „Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs,“ (World Commission on Environment and Development, 1987).

Die Landwirtschaft steht also vor der Herausforderung, unter erschwerten Umweltbedingungen mit weniger, teilweise in menschlichen Zeiträumen endlichen, Ressourcen mehr Menschen mit Nahrungsmitteln zu versorgen. Wobei natürlich nicht unerwähnt bleiben darf, dass auch die Konsumgewohnheiten der Menschen, die Wirtschaft und die Politik einen Teil der Verantwortung tragen.

## Wieso das Thema NPK-Dünger?

Damit auch in Zukunft genügend Nahrungsmittel zur Verfügung stehen, dürfen die landwirtschaftlichen Erträge nicht abnehmen oder sie müssen gesteigert werden (IAASTD, 2009). Um die Erträge langfristig zu sichern oder zu erhöhen und die Böden nicht auszulaugen, müssen die durch die Ernte entzogenen Nährstoffe im Boden wieder ersetzt werden (Ciceri, Manning, & Allanore, 2015; Sheldrick, Syers, & Lingard, 2002). Die entzogenen Nährstoffe können durch organische und mineralische Düngemittel, durch menschliche oder tierische Exkremente oder im Fall von Stickstoff (N) durch Leguminosen ersetzt werden (Sheldrick et al., 2002).

Die heutige Landwirtschaft ist stark von mineralischen Düngern abhängig. Es wird geschätzt, dass mit mineralischen Düngemitteln ungefähr die Hälfte der Nahrungsmittel der Weltbevölkerung produziert wird (Sutton et al., 2013).

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den drei Elementen N, Phosphor (P) und Kalium (K), da sie die Hauptbestandteile vieler mineralischer Dünger darstellen (Benton, 2012) und als wichtigste Pflanzen-Nährelemente in der Nahrungsmittelproduktion gelten (Manning, 2015). N, P und K gehören zu den neun Makronährelementen der Pflanzen und werden über die Bodenlösung aufgenommen (Benton, 2012).

Gemäss der International Fertilizer Industry Association (IFA) wurden im Jahr 2010 geschätzt 172.2 Mt NPK-Dünger weltweit eingesetzt. Davon 104.3 Mt N, 40.5 Mt  $P_2O_5$  und 27.4 Mt  $K_2O$  (Heffer, 2013).

Die Produktion von NPK-Düngern ist mit einigen Risiken behaftet und steht in Zusammenhang mit diversen Umweltbelastungen. Bei der Herstellung von P- und K-Düngemitteln liegt das grösste Risiko in der Endlichkeit der Reserven (Cordell, White, & Lindström, 2011; Manning, 2015; Mohr & Evans, 2013; USGS, 2015a), bei N im grossen Energieverbrauch (Ahlgren, Bernesson, Nordberg, & Hansson, 2010; Motavalli, 2014). Zu den gravierendsten Umweltbelastungen beim Abbau und der Weiterverarbeitung von P und K gehören die unsachgemässe Lagerung und Entsorgung der anfallenden Abfälle (Lottermoser, 2010; Ripley, Redmann, & Crowder, 1996).

### **Kartographische Darstellung**

Das Thema der Produktion von NPK-Dünger und seiner Auswirkungen und Risiken bietet sich speziell für eine kartographische Darstellung an, da die Reserven und Produktionsstätten weltweit verteilt sind. Die ungleiche Verteilung der Reserven (Ciceri et al., 2015; USGS, 2015a) und der Einsatz der Düngemittel können auf einer Karte verständlicher dargestellt werden als in Tabellen.

Wieso Karten gute Mittel zur Darstellung statistischer und anderer Daten sind, beschreibt Schulz (2014, S. 15) im folgenden Satz: „Die Karte lässt uns Raumstrukturen verstehen, ohne überall hinfahren zu müssen.“ Speziell in der heutigen Informationsgesellschaft sind Karten notwendiger denn je, um die immer komplexeren Sachverhalte dieser Welt anschaulich darzustellen (Grelot, 1994, zitiert nach Schulz, 2014).

Atlanten zum Thema Landwirtschaft und Ernährung sind keine Seltenheit (siehe Bartz et al., 2015; Jaffe et al., 2013; Kalverkamp et al., 2015; Sebastian, 2014). Auch Karten zum Thema NPK-Dünger gibt es Einige (siehe Bartz et al., 2015; BGR, 2014; Fixen & Johnston, 2012; Schröder, Cordell, Smit, & Rosemarin, 2010; Sutton et al., 2013). Karten zum Thema Phosphor- und Kaliumdüngerherstellung, ihren Reserven und den lokalen Umweltauswirkungen an den Produktionsorten konnten zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit keine gefunden werden.

## **Ziel und Fragestellung**

Das Ziel dieser Arbeit ist, wissenschaftliche Erkenntnisse zu den Risiken und Auswirkungen der Produktion von NPK-Düngern auszuwerten und mittels kartographischer Darstellung die wichtigsten Zusammenhänge zu visualisieren (siehe Anhang 2). Dabei werden folgende Fragen beantwortet:

- Welche Risiken und Auswirkungen bringt die Produktion von NPK-Düngern mit sich?
- Welche Risiken und Auswirkungen sind problematisch?
- Wie können die gewonnen Erkenntnisse auf Karten visualisiert werden und was kann aus den Darstellungen abgeleitet werden?

Zu den Risiken der Produktion werden aufgrund der Endlichkeit von P und K in der Erdkruste wissenschaftliche Artikel zusammengestellt, die die Reichweite der Reserven dieser Rohstoffe analysieren. Da der Energieverbrauch in Zukunft ebenfalls ein Risiko darstellen kann, wird für alle drei Dünger der Energieaufwand für die Herstellung untersucht.

Bezüglich der direkten Auswirkungen der Düngerproduktion wird recherchiert, welche Umweltschäden auftreten können und in welchen Ländern konkrete Fälle von Verschmutzungen vorliegen.

Ein Teil dieser Daten wird in einen räumlichen Kontext gebracht und auf GIS-Karten visualisiert. Als Grundlage für die Herstellung der Karten wird eine Analyse verschiedener Ressourcen- und Dünger-Karten durchgeführt. Die erstellten Karten sollen einen Beitrag zum Projekt „Foodatlas - ein Buchprojekt zur Schweizer Lebensmittelgeographie“ der Forschungsgruppen "Geography of Food" und "Geoinformatik" der ZHAW Wädenswil leisten.

## 2 Historischer Exkurs

Im Kontext der Diskussion um die Reichweite endlicher Ressourcen stellt sich die Frage, ob die Menschheit rechtzeitig auf Alternativen umsteigt oder ob es zur globalen Katastrophe kommt. In diesem Kapitel werden Beispiele beschrieben, die exemplarisch aufzeigen, was schwindende Dünger-Ressourcen in der Vergangenheit ausgelöst haben.

Ein grosser Teil der globalen Landwirtschaft ist heute stark von nicht erneuerbaren Rohstoffen abhängig (Bardi, El Asmar, & Lavacchi, 2013; IAASTD, 2009; Sutton et al., 2013). Neben fossilen Brennstoffen zählen auch Kalium- und Phosphordünger zu den endlichen Rohstoffen (Ciceri et al., 2015; Fixen & Johnston, 2012; Sutton et al., 2013). Stickstoffdünger können nicht als endlich gelten, sind aber durch ihren hohen Energieverbrauch auf billige, heute fossile Energieträger angewiesen (Ahlgren et al., 2010; Motavalli, 2014). Was passieren kann, wenn das Überleben einer Gesellschaft zu stark von endlichen Ressourcen abhängig ist, zeigen die Beispiele der Länder Nordkorea und Nauru. Als positives Beispiel zeigt das Beispiel von Kuba, wie aus einem Versorgungseinbruch nichterneuerbarer Ressourcen ein Wandel zu einer nachhaltigeren Gesellschaft möglich ist.

Gemäss Haggard und Noland (2009) setzt Nordkoreas Landwirtschaft stark auf mineralische Düngemittel. Der grösste Teil dieser Düngemittel wurde bis zum Jahr 2006 von Südkorea gespendet. Da Nordkorea im Jahr 2006 Raketen- und Atomwaffentests durchführte, stellte Südkorea die Lieferung der Düngemittel ein. Zusammen mit dem Rückgang der externen Lebensmittelhilfe und Überschwemmungen sank die Lebensmittelversorgung in Nordkorea im Jahr 2007 und 2008 stark. Die Regierung konnte die Ausfälle nicht durch Zukäufe wettmachen, da die globalen Nahrungsmittelpreise im Jahr 2007 stark angestiegen waren.

Die Autoren der Studie gehen davon aus, dass in Nordkorea im Jahr 2007 erstmals seit der grossen Hungerkatastrophe 1990, bei der zwischen 600'000 und einer Million NordkoreanerInnen starben, wieder viele Menschen hungerten. Dieses Beispiel zeigt, wie eine stark von externen und nicht erneuerbaren Ressourcen abhängige Gesellschaft durch klimatische und politische Ausnahmesituationen in eine Notlage geraten kann (Haggard & Noland, 2009).

Auf der „anderen“ Seite des Weges mineralischer Düngemittel steht Nauru als düsteres Beispiel für eine negative Entwicklung. Die kleine Koralleninsel Nauru liegt isoliert auf dem Äquator im westlichen Pazifik (Connell, 2006).

Nauru beherbergte grosse Phosphorvorkommen, die heute als komplett erschöpft gelten. Die Ausbeutung des Phosphors in Nauru begann im Jahr 1907, als Nauru ein deutsches Protektorat war. Nachdem die Insel von verschiedenen Nationen besetzt war, wurde sie 1968 unabhängig. Da die

Phosphorminen von da an in der Hand der Menschen von Nauru waren, stieg der Wohlstand der BewohnerInnen massiv an. Es wird damit gerechnet, dass Nauru damals das höchste Pro-Kopf-Einkommen des gesamten Pazifiks oder sogar der gesamten Welt hatte. Die Schattenseite der Medaille lag unter anderem in der nicht vorhandenen Landwirtschaft und in den grossen Einkommensunterschieden. In die Planung einer Strategie für die Post-Phosphor-Zeit wurde nicht investiert (Connell, 2006).



**Abbildung 1: Luftfotografie der Insel Nauru: 80% der Insel gleicht einer Mondlandschaft (Lister, 2012)**

Am Ende des 20. Jahrhunderts waren Naurus Phosphorvorräte praktisch erschöpft. Auf Grund der Minen gleicht die Insel heute zu 80% einer Mondlandschaft (siehe Abbildung 1). Anfragen für eine Minen-Sanierung bei der ehemaligen Besatzungsmacht Australien wurden schon vor der Unabhängigkeit abgelehnt. In den folgenden Jahren stieg die Arbeitslosenrate massiv an, ein grosser Teil der Infrastruktur brach zusammen und es kam zu Hungersnöten. Naurus Überleben ist seither von ausländischen Spenden abhängig und gilt als „failed state“ (Connell, 2006). „Nauru is a story of power, exploitation, and greed and the selling of the future for short term gain“ fassen McDaniel und Gowdy (2000) in Connell (2006) die traurige Geschichte von Nauru zusammen.

Die Geschichte von Kuba hingegen zeigt, dass ein Unterbruch in der Versorgung mit fossilen Brennstoffen, Agrochemikalien und chemischen Düngemitteln auch zu einem Umdenken in der Landwirtschaftspolitik führen kann.

Kubas Landwirtschaft war gemäss Koechlin (2002) bis etwa im Jahr 1990 stark industrialisiert, zentralisiert und exportorientiert. 60% der konsumierten Lebensmittel wurden importiert. Durch den Zerfall des sozialistischen Blocks 1989 sank der Import von Lebensmitteln und Agrochemikalien um 80%, die Treibstofflieferungen wurden halbiert. Um eine Hungerkrise abzuwenden, musste

Kuba in kurzer Zeit mit halb so viel Geld doppelt so viele Lebensmittel produzieren. Fidel Castro baute daraufhin einen grossen Teil der konventionellen, auf Monokulturen basierenden Landwirtschaft um. Die Betriebe wurden umstrukturiert und setzten neu auf biologische Landwirtschaft und agro-ökologische Techniken. Da für die bestehenden, auf Export ausgerichteten Grossbetriebe der Übergang zu einer nachhaltigen Landwirtschaft kaum möglich war, wurden sie auf kleinere Kooperativen aufgeteilt (Koechlin, 2002).

In Bezug auf die Kalorienversorgung der Bevölkerung war das Programm ein grosser Erfolg. Während vor der Krise im Jahr 1990 pro Person 2600 kcal zur Verfügung standen, waren es während der Krise teilweise nur zwischen 1000 und 1500 kcal. Ende der Neunzigerjahre war der Wert aber schon wieder auf 2700 kcal pro Kopf angestiegen (Koechlin, 2002).

Natürlich können die genannten Beispiele nicht direkt auf die globale Situation der Menschheit übertragen werden. Trotzdem zeigen sie auf, wie die Abhängigkeit endlicher Ressourcen in die Katastrophe führen oder aber durch nachhaltigere Konzepte verhindert werden kann.



### 3 Material und Methoden

In den folgenden Kapiteln wird beschrieben, auf welchen Datengrundlagen die Ergebnisse dieser Arbeit basieren und wie die Karten erstellt wurden.

#### 3.1 Material

Für die vorliegende Arbeit wurden neben wissenschaftlichen Publikationen Bücher und Zeitungsartikel ausgewertet.

Die erstellten Karten wurden mit der Software ArcGIS 10.2.2 der Firma ESRI erstellt. Die Karten wurden danach mit Adobe Illustrator CS6 nachbearbeitet. Die Tabellen wurden mit Microsoft Excel 2010 erstellt.

Für die Weltkarte wurde ein von der ZHAW zur Verfügung gestelltes Shapefile verwendet. Es beinhaltet eine Weltkarte, die von der Webseite [www.naturalearthdata.com](http://www.naturalearthdata.com) ("Natural Earth", 2015) stammt. Die Grunddaten der Karte liegen im Koordinatensystem WGS84 vor. Als Projektion wird dieselbe wie für den „Food Atlas“ „Robinson“ verwendet.

Für die Geolokalisierung wurde die Webseite <http://www.touristos.fr/Outils/localisation-mini.html> benutzt, die auf Google Maps basiert ("Los Turistos", 2015).

Tabelle 1 zeigt, welche Quellen und Daten für welche Karte verwendet wurden.

**Tabelle 1: Grunddaten der erstellten Karten**

Karte	Grundkarte	Quellen
Haupt-Karte P	Weltkarte	Reserven: Jasinski (2015a) Produktion: Jasinski (2015a) Umweltbelastungen: Aoun et al. (2010); Gaudry et al. (2007); Rentería-Villalobos et al. (2010); Pérez-López et al. (2007); Lottermoser (2010); Othman & Al-Masri (2007); Wali et al. (2013); Gnandi et al. (2006); Butusov und Jernelöv (2013); Gusev (2006)
Haupt-Karte K	Weltkarte	Reserven: Jasinski (2015b) Produktion: Jasinski (2015b) Umweltbelastungen: Vonhof (1975); Saskatchewan ECO-Network (2001); Gorostiza Langa (2014); Lepikhin, Lyubimova, Pshakova und Tiunov (2012); Bäche und Coring (2011); Braukmann und Böhme (2011)
"small multiples" P	Weltkarte	Reserven: Jasinski (2015a) Produktion: Jasinski (2015a)
"small multiples" K	Weltkarte	Reserven: Jasinski (2015b) Produktion: Jasinski (2015b)

## 3.2 Methoden

In den folgenden Abschnitten wird erklärt, wie die Karten erstellt wurden. Es wurde für Phosphor und für Kalium je eine Haupt-Karte und eine zweite Karte „small multiples“ erstellt, auf der vier Zukunftskarten dargestellt sind.

### Haupt-Karte

Auf den P- und K-Hauptkarten wurden die Reserven durch Farben dargestellt, die Produktionsmenge als Balken und die Umweltbelastungen als Tropfensymbol. In Tabelle 2 sind die Grunddaten für die Erstellung der Karten in ArcGIS zusammengestellt.

**Tabelle 2: Grunddaten für die Karten-Erstellung**

<b>Grundkarte</b>	Weltkarte
<b>Koordinatensystem</b>	WGS 84
<b>Projektion</b>	Robinson

Die verschiedenen Daten wurden in ArcGIS gemäss Tabelle 3 visualisiert. Tabelle 4 listet die Klassen für die Darstellung der Reserven auf.

**Tabelle 3: GIS-Visualisierung der Daten der Haupt-Karten**

Daten	Darstellungs-Typ (im ArcGIS)	Details der Darstellung	Farbe
Reserven	Graduated colors	Klassen gemäss Tabelle 4	Verlauf Gelb bis Braun, Klasse 0 ist Hellgrau
Produktion	Bar/Column	nur P: Balken die Werte <2500 darstellen haben eine fixe Grösse von 2 Pixel	Dunkelblau
Umweltschäden	Single symbol	Tropfen-Symbol	Grün. Bei K: blau bei befürchteten Verschmutzungen

**Tabelle 4: Reserven-Klassen für die Karten-Darstellung**

Klasse	Reserven (in 1'000t)
0	0
1	1 bis 50'000
2	50'001 bis 100'000
3	100'001 bis 500'000
4	500'001 bis 1'000'000
5	1'000'001 bis 5'000'000
6	5'000'001 bis 10'000'000
7	10'000'001 bis 50'000'000

Umweltschäden aus den Tabellen in Kapitel 4.3 geolokalisiert und zusammengefasst (siehe Tabelle 5 (für K Tabelle 6)). Die Koordinaten in der x- und y-Spalte sind in geographischer Länge und Breite angegeben. Die in der Spalte „Auf der Karte verwendet“ als „Nein“ markierten Einträge wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit ausgeblendet.

**Tabelle 5: Geolokalisierte Umweltschäden bei Phosphordünger-Produktionsstätten**

Land	Ort	x	y	Auf der Karte verwendet
Libanon	46 km nördlich von Beirut, am Meer (auf Karte geschätzt: zwischen Byblos/Enfeh:Selaata)	35.6640062000	34.2795886982	Ja
Marokko	Jorf Lasfar	-8.6294444000	33.1613888982	Ja
Spanien	37°15.3'N, 6°54'W (nahe bei Huelva)	-6.9447224000	37.2614209981	Nein
Spanien	Huelva	-6.9128637000	37.2318728981	Ja
Syrien	Tartous	35.8833330000	34.8833330000	Ja
Syrien	Homs	36.7094440000	34.7308330000	Nein
Tunesien	34° 42' 10" N, 10° 43' 26" E (Sfax-Region)	10.7239000000	34.7027999982	Ja
Togo	Agbodrafo	1.4166669000	8.0833329995	Ja
USA	Riverview(Florida)	-82.3264809000	27.8661363984	Ja
USA	Mulberry(Florida)	-81.9734172000	27.8953037984	Nein
USA	Hopewell (Florida)	-82.1238900000	27.9283299984	Nein
USA	Payne Creek (Florida)	-81.5418158000	29.1924451984	Nein
USA	Gibson (Florida)	-82.3825930000	27.8536364984	Nein
USA	Bangs Lake (Florida)	-81.5157535000	27.6648273985	Nein
Weissrussland	Polesye (Weissrussland)	26.2902778000	52.2769444000	Ja

**Tabelle 6: Geolokalisierte Umweltschäden bei Kaliumdünger-Produktionsstätten**

Land	Ort	x	y	Realer_Vorfall	Auf der Karte verwendet
Kanada	Saskatchewan	-106.4508639000	52.9399158979	0	Ja
Spanien	Fluss Llobregat	1.8888889000	41.8833332980	1	Ja
Russland	Fluss Kama	49.7860205000	55.2891757979	1	Ja
Deutschland	Fluss Werra, Spichra	10.2375000000	51.0219439979	1	Ja

Die Karten wurden anschliessend mit Adobe Illustrator visuell überarbeitet.

### „small multiples“

Auf den „small multiples“ wurden die Länder gemäss ihrem Reserven-Stand im angegebenen Jahr mit einer Farbe zwischen Gelb und Braun eingefärbt. Wie für die Hauptkarten sind in Tabelle 2 die Grunddaten für die Erstellung der Karten in ArcGIS zusammengestellt. Die Visualisierung der Daten ist in Tabelle 7 zusammengefasst.

**Tabelle 7: GIS-Visualisierung der Daten der „small multiples“-Karten**

Daten	Darstellungs-Typ (im ArcGIS)	Details der Darstellung	Farbe
Reserven	Graduated colors	Klassen gemäss Tabelle 4	Verlauf Gelb bis Braun, Klasse 0 ist Hellgrau

Für die Berechnung der zukünftigen Reserven der einzelnen Länder wurde eine modifizierte R/C-Methode angewendet. Im Gegensatz zur R/C-Methode wurde angenommen, dass die weltweite Produktion jährlich um 1% steigt, anstatt konstant zu bleiben. Wenn ein Land zu einem bestimmten Zeitpunkt keine Reserven mehr hat, wurde seine Produktionskapazität auf die anderen Länder verteilt. Dabei wurde die neue Produktionsmenge prozentual anhand der in den Ländern noch verfügbaren Reserven verteilt. Beispielsweise übernahm Marokko mit der Zeit immer mehr Teile der Produktion von „aussteigenden“ P-Produktionsländern, da es mit Abstand am meisten Reserven hatte.

Die verbleibenden Reserven wurden anhand der Formeln in Abbildung 2 berechnet. Dabei steht  $x$  für das aktuell berechnete Jahr,  $R$  für die verbleibenden Reserven eines Landes und  $P$  für die Produktionsrate eines Landes. Die Variable  $D$  steht für das „Defizit“, welches entsteht, wenn ein Land keine Reserven mehr hat und darum seine Produktionsmenge von anderen Ländern übernommen werden muss.  $R_{tot}$  ist die gesamte Reservemenge und  $P_{tot}$  die gesamte Abbaurate aller Länder.  $W$  steht für die Wachstumsrate der Produktionsmengen in Prozent.

$$\begin{aligned} Rx &= R_{x-1} - P_x \\ Px &= P_{x-1} + \frac{P_{x-1} * W}{100} + \left( \frac{D_x * R_{tot_{x-1}}}{R_{x-1}} \right) \\ Dx &= \frac{P_{tot_{x-1}} * W}{100} - P_{tot_x} \end{aligned}$$

Abbildung 2: Formeln für die Berechnung der P- und K-Reserven in der Zukunft

## 4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel wird erklärt, wie die Elemente N, P und K vom Dünger in die Pflanze gelangen. Danach wird Literatur zur Diskussion über die Reichweite der Reserven dieser Elemente zusammengestellt und aufgezeigt, welche direkten Umweltauswirkungen mit der Düngerproduktion einhergehen. Anschliessend wird der Energieverbrauch von N, P und K-Dünger aufgezeigt. Im letzten Kapitel werden die gewonnen Erkenntnisse auf Karten visualisiert.

### 4.1 Dünger-Chemie zwischen Pflanze und Bergwerk

Stickstoff, Phosphor und Kalium sind für das Leben zwingend notwendige Baustoffe (Benton, 2012; Frink, Waggoner, & Ausubel, 1999; Smil, 2000). In Pflanzen sind sie unter anderem für Aminosäuren (also auch für Proteine), für ATP, Chlorophyll, DNA, RNA, für den Turgor-Druck sowie die Öffnung und Schliessung der Stomata mitverantwortlich (siehe Tabelle 8).

**Tabelle 8: Die Elemente N, P und K und ihre Funktionen in Pflanzen (Benton, 2012)**

Element	Essentiell für folgende Pflanzen-Funktionen/Verbindungen
N	Aminosäuren und daraus synthetisierte Proteine
	Chlorophyll
	Alkaloide
P	RNA
	DNA
	ATP
K	Turgor-Druck
	Öffnung/Schliessung der Stomata

#### Aufnahme in die Pflanze

Pflanzen nehmen N, P und K über ihre Wurzeln auf. Dies ist aber nur möglich, wenn diese Elemente in gewissen Verbindungen vorkommen. Während K als simples  $K^+$  aufgenommen werden kann, muss N in Ammonium ( $NH_4^+$ ) oder Nitrat ( $NO_3^-$ ), P unter anderem in Dihydrogen-Phosphat ( $H_2PO_4^-$ ) oder Monohydrogenphosphat ( $HPO_4^{2-}$ ) gebunden sein (Benton, 2012).

#### Wieso wird gedüngt?

Um in der Landwirtschaft langfristige Erträge sicher zu stellen, müssen die dem Boden durch die geernteten Pflanzen entzogenen Nährstoffe wieder ersetzt werden. Die natürliche Verwitterung reicht dabei in den meisten Fällen nicht für den Nährstoffnachschub, den intensive Landwirtschaft braucht, um hohe Erträge zu produzieren (Ciceri et al., 2015; Reijnders, 2014; Zörb, Senbayram, & Peiter, 2013). Die entzogenen Nährstoffe können durch organische und mineralische Düngemittel, durch menschliche oder tierische Exkremente, oder im Fall von N, durch Leguminosen ersetzt werden (Sheldrick et al., 2002). Normalerweise wird so viel gedüngt, dass die durch die Ernte ent-

zogenen Nährstoffe wieder ersetzt werden (Manning, 2015). Die mineralischen Düngemittel werden in fester, flüssiger oder gasförmiger Form ausgebracht (Benton, 2012).

### In welcher Form kommen die Elemente in Düngern vor?

N kommt in verschiedenen mineralischen Düngemitteln in den Verbindungen Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) oder der Kombination aus beiden ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) vor. Harnstoff [ $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ] ist die Ausnahme, die die Regel bestätigt. Allerdings wird der hier gebundene N zu Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) hydrolysiert, wenn der Dünger mit Erde in Kontakt kommt (Benton, 2012). P ist in verschiedenen Düngemitteln unter anderem als Dihydrogen-Phosphat ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), Monohydrogenphosphat ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) oder Orthophosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) gebunden, K kommt als K-Kation ( $\text{K}^+$ ) in den Düngemitteln vor (Benton, 2012).

Tabelle 9 fasst zusammen, in welcher Form die Elemente N, P und K im Gestein oder der Luft vorkommen, in welche Form sie überführt werden, um Düngemittel herzustellen, wie sie in Düngemitteln gebunden sind und wie die Pflanzen diese aufnehmen können.

**Tabelle 9: Chemische Verbindungen von N, P und K zwischen Ausgangsmaterial und Pflanzenaufnahme**

	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>
Aufnahme in die Pflanze	$\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^- / \text{HPO}_4^{2-}$	$\text{K}^+$
Form in min. Düngern (unter anderem)	$\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^- /$ $(\text{NH}_4\text{NO}_3) /$ $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$	$\text{H}_2\text{PO}_4^- / \text{HPO}_4^{2-} /$ $\text{PO}_4^{3-}$	$\text{K}^+$
Ausgangsprodukt für Düngerherstellung	$\text{NH}_3$	$\text{H}_3\text{PO}_4$	KCl
Form in Mineralien (Hauptformen)	$\text{N}_2$ (aus der Luft)	$[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F})] /$ $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{F})]$	KCl / $\text{KMgCl}_3 /$ $[\text{KMg}(\text{Cl} \text{SO}_4)] /$ $[\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3]$

Neben Düngemitteln, die aus Verbindungen von N, P oder K mit anderen Elementen bestehen, werden auch NPK-Dünger, die alle drei genannten Elemente enthalten, hergestellt (Benton, 2012).

Nachdem geklärt ist, wieso die Elemente N, P und K von Pflanzen benötigt werden, wie sie aufgenommen werden und in welcher Form sie in den Boden gelangen, wird in den folgenden Kapiteln unter anderem beschrieben, wie diese Elemente in die Düngemittel gelangen.

#### 4.1.1 Stickstoffdünger-Herstellung

Folgende Verfahren wurden oder werden angewendet, um aus Wasserstoff (H) und N Ammoniak herzustellen:

- Verbrennung von Kohle in Koksöfen unter anaeroben Bedingungen (Galloway, 2013).
- Synthese von Kalziumkarbid ( $\text{CaC}_2$ ) mit  $\text{N}_2$ . Daraus entsteht  $\text{CaCN}_2$ , woraus mit sehr heissem Dampf  $\text{CaCO}_3$  und  $\text{NH}_3$  hergestellt werden kann. Dieser Prozess ist sehr energieintensiv (Galloway, 2013).
- Das Haber-Bosch-Verfahren: Fritz Haber entdeckte die Synthese von Ammoniak aus seinen Elementen:  $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$ . Carl Bosch, angestellt bei der damals weltgrössten Chemie-Firma BASF, war massgeblich daran beteiligt, dass diese Firma die Produktion aufnahm. Er entwickelte mit anderen und Fritz Haber das Verfahren weiter (Smil, 2001).  
N wird aus der Luft,  $\text{H}_2$  wird durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe gewonnen. Früher wurde dafür Kohle, heute hauptsächlich Erdgas verwendet (Smil, 2001; Stout, 1990). Die Herstellung geschieht unter hohen Temperaturen, hohem Druck und benötigt einen metallischen Katalysator (Galloway, 2013; Smil, 2001).

Heute hat das Haber-Bosch-Verfahren alle anderen Verfahren für die Herstellung mineralischer Stickstoffdünger verdrängt (Crews & Peoples, 2004; Galloway, 2013).

20% des durch Haber-Bosch-Verfahren gebundenen Ammoniaks wird in der Industrie gebraucht. Der Rest wird als Dünger in der Landwirtschaft verwendet (Galloway, 2013; Galloway et al., 2008).

#### 4.1.2 Phosphordünger-Herstellung

P wird heute hauptsächlich in Bergwerken abgebaut. Als Ausgangsmineral für Phosphordünger wird hauptsächlich Fluorapatit [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F})$ ] oder Karbonat-Fluorapatit [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{CO}_3)(\text{F})$ ] verwendet. Der Phosphorgehalt eines Erzes wird speziell für die Düngerproduktion in Diphosphorpentoxid ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) angegeben (Scholz & Wellmer, 2013). Die genannten Mineralien stammen heute aus drei, in Zukunft vielleicht aus vier verschiedenen ausbeutbaren Quellen:

- Guano
  - Auf tropischen Koralleninseln abgelagerte ausgelaugte, oxidierte und kristallisierte Vogel-Exkremente. Die grossen Guano-Ablagerungen wurden vollständig abgebaut. Guano spielt darum in der Phosphor-Düngerindustrie heute keine Rolle mehr (Cordell, Drangert, & White, 2009; Smil, 2001).
- Karbonatite und alkalisches Vulkangestein
  - Durch Verwitterung werden die wasserlöslichen Karbonatminerale aus Karbonatiten und alkalischem Vulkangestein ausgewaschen, wodurch Fluorapatite und andere

verwitterungsresistente Mineralien konzentriert werden (Lottermoser, 2010). Diese Erze enthalten weniger als 5%  $P_2O_5$ . Weniger als 20% des im Jahre 2010 abgebauten Phosphors stammte aus diesen Quellen. Die Hauptproduzenten sind heute Russland, Finnland, Südafrika, Simbabwe und Brasilien (Scholz & Wellmer, 2013).

- Phosphorite
  - Marine Sedimente, die neben Karbonat-Fluorapatit diverse mineralische Verunreinigungen enthalten (Lottermoser, 2010). Normalerweise enthalten diese Erze 20 bis 35%  $P_2O_5$ . Die Hauptproduzenten von sedimentärem P sind China, Marokko, die USA und Tunesien (Scholz & Wellmer, 2013). Über 80% des in Düngemitteln verwendeten Phosphorgesteins stammt aus diesen Quellen (Butusov & Jernelöv, 2013; Scholz & Wellmer, 2013).
- Offshore Mining
  - Noch nicht durchgeführt, aber schon in Planung stehen einige Projekte, die Phosphorvorkommen im Meer auf 400 Meter Tiefe erschliessen wollen (Scholz & Wellmer, 2013).

Vom weltweit abgebauten P werden 82% für die Düngerherstellung verwendet (Cooper, Lombardi, Boardman, & Carliell-Marquet, 2011; Scholz & Wellmer, 2013).

Um Phosphorsäure, das Ausgangsmaterial für die Phosphordünger, zu produzieren, kommen entweder thermische Trockenverfahren oder Nassverfahren mit Säure in Frage. Da Nassverfahren ökonomischer sind, werden hauptsächlich diese eingesetzt (Bartels & Gurr, 1994; Tayibi, Choura, López, Alguacil, & López-Delgado, 2009). Dabei wird das geförderte Phosphat-Gestein mit Schwefelsäure zu Phosphorsäure ( $H_3PO_4$ ) synthetisiert. Beim Prozess entstehen weitere Verbindungen, die teilweise gravierende Umweltbelastungen verursachen (siehe Kapitel 4.3.2) (Lottermoser, 2010).

#### 4.1.3 Kaliumdünger-Herstellung

K wird in Bergwerken abgebaut. Es wird aus Pottasche-Ablagerungen oder als Nebenprodukt von Steinsalz gewonnen. Meistens werden die Erze aus Minen unterhalb der Erdoberfläche abgebaut (Lottermoser, 2010).

Die im Bergbau meistgenutzten K-Mineralien sind Sylvit (KCl), Karnallit ( $KMgCl_3$ ), Kainit [ $KMg(Cl|SO_4)$ ] und Langbeinit [ $K_2Mg_2(SO_4)_3$ ], wobei Sylvit den grössten Teil des Erzes ausmacht (Lottermoser, 2010; Ripley et al., 1996). Neben diesen Mineralien gibt es noch einige weniger bedeutende Erze, die auch K enthalten (Williams-Stroud, Searls, & Hite, 1994). Die Mengen K werden meistens in Kaliumoxid ( $K_2O$ ) angegeben, obwohl die Form, in welcher K in Sylvit vorkommt,



KCl ist. Die KCl-Werte können mit 0.63 multipliziert werden, um  $K_2O$ -Werte zu erhalten (Ripley et al., 1996). Momentan abgebaute Pottasche-Erze beinhalten 8 bis 30%  $K_2O$  (Lottermoser, 2010).

Die abgebauten Erze werden mit verschiedenen Verfahren weiter aufbereitet (Rauche & Fulda, 2001):

- Mit Flotation, einem chemisch-physikalischen Trennverfahren, wird bei Sylvit-Erzen mit hohen  $K_2O$ -Anteilen der Anteil KCl herausgetrennt und konzentriert.
- Bei Karnalliten mit tiefen  $K_2O$ -Anteilen wird das KCl mittels heisser Auswaschung herausgelöst.

Das herausgelöste KCl kann entweder direkt als Dünger verwendet oder in der Düngerindustrie weiterverarbeitet werden (Benton, 2012).

Pottasche wird hauptsächlich für Düngemittel benützt. Nur 5% wird in anderen industriellen Bereichen verwendet (Haryett, 1983, zitiert nach Ripley et al., 1996; Williams-Stroud et al., 1994).

## 4.2 Reserven

Als Reserve wird festes, flüssiges oder gasförmiges Material in der Erdkruste bezeichnet, das mit der zur gegebenen Zeit verfügbaren Technologie ökonomisch verwertbar abgebaut werden kann (Scholz & Wellmer, 2013; USGS, 2014).

Als Reserven-Basis werden jene Materialien bezeichnet, die zwar theoretisch in der Zukunft abbaubar wären, aber unter momentanen ökonomischen Bedingungen zu teuer sind, um ausgebeutet zu werden. Die Reserven-Basis muss gewisse chemische und physikalische Eigenschaften erfüllen, die eine zukünftige Ausbeutung möglich machen. Die Eigenschaften umfassen unter anderem die Tiefe unter der Erdoberfläche, Mindestgehalte an Mineralien und die Dicke des Vorkommens. Die Reserven sind in der Reserven-Basis mit eingeschlossen (USGS, 2014).

Der Begriff Ressourcen beschreibt die gesamte Menge eines Materials in der Erdkruste, unabhängig davon, ob es verwertbar ist oder nicht (USGS, 2014).

Die Grenzen zwischen den verschiedenen Begriffen sind fließend (Scholz & Wellmer, 2013), da sie sich auf ökonomische Verhältnisse beziehen.

In den folgenden Kapiteln wird die Situation der weltweiten P- und K-Reserven aufgezeigt. Bei der Herstellung von Stickstoffdüngern durch das Haber-Bosch-Verfahren wird ein anderer H-Lieferant, heute hauptsächlich Erdgas, benötigt. Da Luft-Stickstoff ( $N_2$ ) voraussichtlich nicht ausgehen wird (Kraus, 2004), wird Literatur zur Reichweite verschiedener H-Quellen zusammengestellt.

### 4.2.1 Stickstoff-Reserven

Die Atmosphäre der Erde besteht ungefähr zu 78% aus N (Kraus, 2004). Durch das Haber-Bosch-Verfahren wird viel N aus der Luft gebunden und dieser lagert sich schlussendlich, weil die ausgebrachten Mengen nicht schnell genug denitrifiziert werden, in Böden und Gewässern ab (Galloway, 2013). Trotz dieser Tatsache werden die N-Reserven in der Atmosphäre noch lange ausreichen und nicht den kritischen Rohstoff der Stickstoffdüngerherstellung darstellen.

Da zusätzlich zu N für die Herstellung von Ammoniak auch H benötigt wird (Smil, 2001; Stout, 1990), werden hier die möglichen H-Quellen untersucht.

Als mögliche Wasserstoffquellen kommen Erdgas, Biogas, Schweröl und Kohle in Frage (Ahlgren et al., 2010; Motavalli, 2014). Im Gegensatz zu P und K steht hier mit Biogas eine erneuerbare Ressource zur Verfügung.

Wie lange die Erdgas-, Erdöl- und Kohle-Reserven noch reichen, ist umstritten. Gemäss heutigen Voraussagen (siehe Tabelle 10) werden sie aber in den nächsten 50 bis 100 Jahren ihr Fördermaximum erreichen oder ganz ausgehen (zur Peak- und Reichweite-Schätzungsmethoden siehe Ka-

pitel 4.2.2). Da als H<sub>2</sub>-Quelle auch Biogas verfügbar ist, wird es zumindest aus Sicht der Reserven-Schätzung keine Erschöpfung geben.

**Tabelle 10: Reichweiten-Schätzungen verschiedener Autorinnen und Autoren zu den weltweiten Erdgas-, Erdöl- und Kohle-Reserven**

Ressource	Quelle	Reserven-Reichweite oder Peak
Erdgas	Shafiee und Topal (2008)	bis 2042 (mit Anstieg des Verbrauchs) oder 2075 (mit statischem Verbrauch aus dem Jahr 2006).
	Maggio und Cacciola (2012)	Peak zwischen 2024 und 2046.
	Islam (2015)	Aufgrund unbeachteter unkonventioneller Erdgas-Reserven sind weitere 100 Jahre krisenfreie Energiezukunft sicher.
Erdöl	Shafiee und Topal (2008)	bis 2040 (mit Anstieg des Verbrauchs) oder 2045 (mit statischem Verbrauch aus dem Jahr 2006).
	Maggio und Cacciola (2012)	Peak zwischen 2009 und 2021.
	Mohr, Wang, Ellem, Ward und Giurco (2015)	Für zwei Szenarios liegt der Peak im Jahr 2025, für ein drittes wächst der Verbrauch bis 2025 an, bleibt 50 Jahre stabil und sinkt dann.
Kohle	Shafiee und Topal (2008)	bis 2112 (mit Anstieg des Verbrauchs) oder 2205 (mit statischem Verbrauch aus dem Jahr 2006).
	Maggio und Cacciola (2012)	Peak zwischen 2042 und 2062.
	Mohr, Wang, Ellem, Ward und Giurco (2015)	Gemäss drei verschiedenen Szenarien wird der Kohle-Peak vor dem Jahr 2025 erreicht.

#### 4.2.2 Phosphor-Reserven

Der grösste Teil des Wissens über die globalen P-Reserven liegt in den Händen von Minengesellschaften, Consulting-Firmen und unabhängigen, auf Reserven spezialisierten BeraterInnen. Weiter wird von nationalen Ämtern wie dem USGS und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) aus Deutschland sowie internationalen Organisationen wie der IFA oder dem International Fertilizer Development Center (IFDC) Wissen zu den globalen P-Reserven zusammengestellt (Vaccari et al., 2014).

Der grosse Teil der in dieser Arbeit untersuchten wissenschaftlichen Publikationen und Bücher bezieht sich auf Daten des USGS. Ausserdem beziehen sich das UNEP (United Nations Environment Programme) (Syers, Bekunda, & Cordell, 2011), Reporte für die EU (Schröder et al., 2010) und die Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (McClellan & Van Kauwenbergh, 2004) auf die Daten des USGS. Vereinzelt werden in Papers auch Berichte des IFDC beigezogen (Kauwenbergh, 2010), die USGS und IFDC-Berichte korrigieren sich teilweise gegenseitig und kommen oft auf ähnliche Resultate (Kauwenbergh et al., 2013). Aus diesen Gründen wird hier vor allem auf die Schätzungen des USGS eingegangen.

## Entwicklung der Reserven-Schätzung

Aus den Reserven-Angaben des USGS seit dem Jahr 2000 ist ersichtlich, dass die Schätzung der globalen Reserven im Jahr 2011 massiv nach oben korrigiert wurde (siehe Abbildung 3).

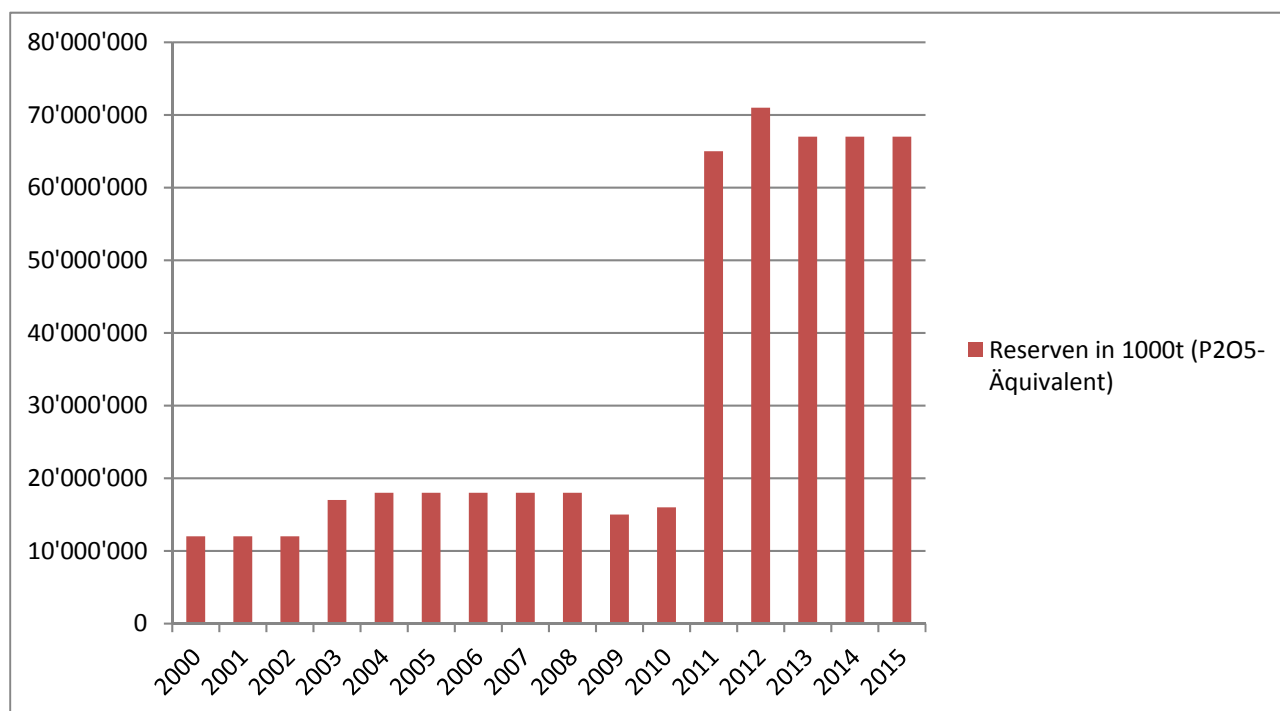


Abbildung 3: Entwicklung der Phosphor-Reserven-Schätzung der Jahre 2000 bis 2015 (Jasinski, 2000, 2001, 2010a, 2011a, 2012a, 2013a, 2014a, 2015a, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009a)

Die massive Veränderung im Jahr 2011 ist hauptsächlich auf eine Erhöhung der Reserven in Marokko zurückzuführen (siehe Tabelle 11). Gemäss Kauwenbergh (2010) ist in früheren Studien schon vermerkt worden, dass in Marokko, Nordafrika und im Nahen Osten die Exploration der Reserven noch nicht abgeschlossen ist. Wahrscheinlich sind die Reserven dort auch nach der Erhöhung der Reserven in Marokko immer noch nicht vollständig erfasst. Gemäss Autor könnte es sein, dass ein Teil der 50 Gt nicht als Reserven, sondern als Reserven-Basis betrachtet werden müssten, da sie schwieriger abbaubar sind.

Tabelle 11: Länder mit grosser Veränderung der geschätzten Phosphor-Reserven zwischen 2010 und 2011 (Jasinski, 2010a, 2011a)

Land	2010 (in 1000t)	2011 (in 1000t)
Syrien	100'000	1'800'000
Senegal	80'000	180'000
Algerien	0	2'200'000
Marokko / westliche Sahara	5'700'000	<b>50'000'000</b>
Russland*	200'000	1'300'000
Total	<b>16'000'000</b>	<b>65'000'000</b>
*gemäss Jasinski (2011a) sind die Daten von Russland nicht unbedingt vergleichbar mit anderen Ländern		

Der starke Anstieg der Reserven-Schätzung des USGS im Jahr 2011 hat die wissenschaftliche Debatte massgeblich beeinflusst. Aus diesem Grund werden in den folgenden Kapiteln nach einer Zusammenfassung verschiedener Methoden zur Bestimmung der Reserven-Reichweite, die Positionen vor und nach der Erhöhung aufgelistet.

### **Schätzungs-Methoden**

So einstimmig sich die wissenschaftlichen Artikel auf die USGS-Reporte beziehen, so unterschiedlich sind ihre Ansichten dazu, welche Schätzungs-Methode die Adäquate ist, um die Reserven-Reichweite von P voraus zu sagen.

Die meistverwendeten Methoden sind folgende:

- R/C ratio (R/C Verhältnis)
  - Das R/C-Verhältnis (Ressourcen/Konsumation-Verhältnis), das auch „statische Ressourcen-Lebenszeit“ genannt wird, beschreibt die Lebensdauer einer Ressource, in der Annahme, es werden keine neuen Lagerstätten gefunden und der Verbrauch bleibt konstant (Vaccari et al., 2014). Die Autoren benützen hier das Wort „Ressource“, die Berechnungen beziehen sich aber auf die jeweils bekannten Reserven. Das R/C-Verhältnis wird teilweise auch R/P-Verhältnis (Ressourcen/Produktions-Verhältnis) genannt (Cooper et al., 2011).
- Hubbert-Kurven-Modellierung
  - Hubbert sagte im Jahr 1949 voraus, dass die Produktion von Erdöl irgendwann ein Maximum (oder Peak) erreichen und danach abnehmen wird. Er argumentierte, dass die kritische Zeit einer Ressource nicht zu dem Zeitpunkt ist, wenn sie aufgebraucht ist, sondern dann, wenn die gut zugänglichen, qualitativ hohen Reserven aufgebraucht sind, was beim Erreichen des Peaks der Fall ist (Cordell et al., 2009). Er sagte damit erfolgreich das Peak-Jahr der Ölförderung in den USA voraus (Vaccari et al., 2014).  
Bei der Hubbert-Kurven-Modellierung wird angenommen, dass die Produktionsrate proportional zum Produkt aus bereits geförderten und zukünftig noch vorhandenen Reserven verläuft. Dabei folgt die Rate über die Zeit einer glockenförmigen Kurve (siehe Abbildung 4) (Vaccari et al., 2014).

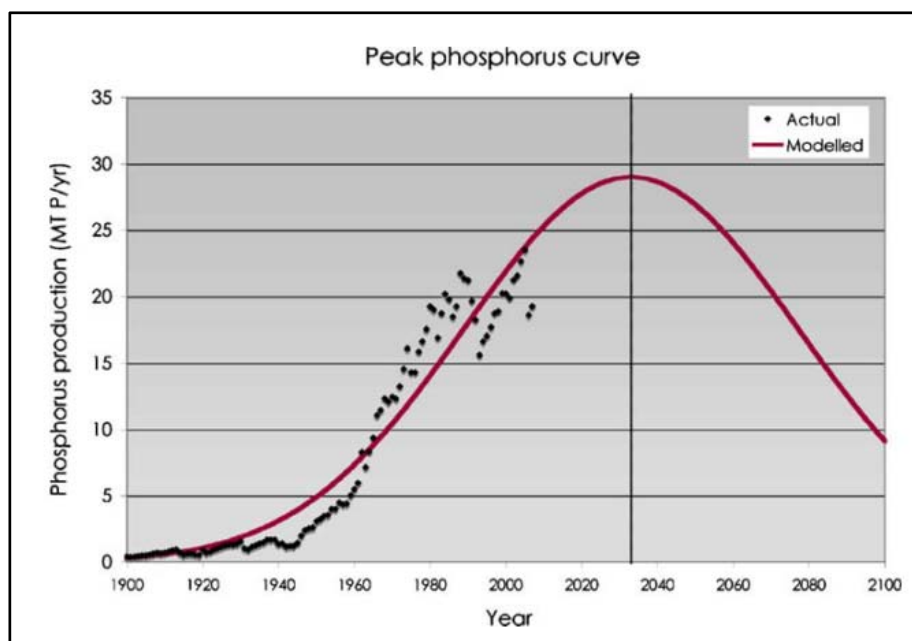


Abbildung 4: Hubbert-Kurve für Phosphor (Cordell et al., 2009)

- „Disaggregated regional production model“
  - Das von Walan, Davidsson, Johansson und Höök (2014) entwickelte Modell funktioniert ähnlich wie die Hubbert-Kurven-Modellierung. Anstelle einer auf globalen Reserven basierenden Kurve werden verschiedene Kurven für die Länder, welche die grössten Reserven aufweisen, berechnet. Wenn die Kurven addiert werden, ergibt das ebenfalls eine glockenförmige Kurve.
- „Virtual Resource Content“
  - Das Konzept des „Virtual Resource Content“ (VRC) basiert auf dem „Virtual Water Content“ Konzept und ist eine Komponente der sogenannten Fussabdruck-Methoden. Zu diesen gehören unter anderem die Methoden des ökologischen Fussabdrucks und des CO<sub>2</sub>-Fussabdrucks (Odegard & van der Voet, 2014). Die Autoren haben die vier vom IPCC aufgestellten Szenarien für das Jahr 2050 als Grundlage für ihre Voraussagen herangezogen. Die Hauptunterschiede der vier Szenarien sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Hauptunterschiede der vier IPCC-Szenarien und ihre Phosphor-Reichweiten (Odegard & van der Voet, 2014)

Kategorie (2050)	A1 (Überfluggesellschaft)	A2 (volle Welt)	B1 (vegetarische Welt)	B2 (low-input Welt)
Bevölkerung	7.78 Milliarden	9.9 Milliarden	7.78 Milliarden	9.15 Milliarden
Techn. Entwicklung	schnell und global	langsam und regional	mittel und global	mittel und regional
Ernährungsgewohnheiten + Fleischkonsum (kg/Person/Jahr)	westliche Ernährungsgewohnheiten (93)	westliche Ernährungsgewohnheiten (62)	vegetarische Ernährung. 9% höherer Milch/Ei/Ölsaaten-Konsum (0)	Ernährung mit wenig Fleisch (37)
Kalorienverbrauch (pro Person/Jahr)	mehr als 2900 kcal	mehr als 2900 kcal	mehr als 2800 kcal	mehr als 2800 kcal
Dünger-Effizienz-Gewinn	10%	0%	15%	15%
Reichweite P-Reserven (Jahre nach 2014)	135	176	285	240

Während ein Teil der wissenschaftlichen Quellen die Meinung vertritt, dass die Hubbert-Kurven-Modellierung ein gutes Mittel zur Bestimmung der kritischen Phase der Phosphorgewinnung ist (Cordell et al., 2009; Déry & Anderson, 2007; Ward, 2008), sind andere der Ansicht, dass diese Methode bestenfalls als „früher Warn-Indikator“ dienen kann, aber nicht dazu, genaue Vorhersagen zu machen (Hendrix, 2011; Scholz & Wellmer, 2013; Vaccari et al., 2014; Vaccari & Strigul, 2011; Walan et al., 2014). Gemäss Mohr und Evans (2013) ist die Methode nur dann genau, wenn sie für ein Land angewendet wird, in dem der „Peak“ schon vorbei ist.

Im Gegensatz zu den VerfechterInnen der Hubbert-Kurven-Modellierung argumentieren Walan et al. (2014), dass ihr „Disaggregated regional production model“ nicht zu globalen Phosphor-Reichweiteschätzungen herangezogen werden soll. Es dient vielmehr dazu, abzuschätzen, welche Länder welche Produktionsvolumen aufrechterhalten müssen, um den zukünftigen Phosphor-Bedarf zu decken.

### Prognosen basierend auf USGS-Reports vor 2011

Folgende Artikel beziehen sich auf die USGS-Daten vor dem Jahr 2011 und kommen daher mehrheitlich zum Schluss, dass der einfach verfügbare Anteil der weltweiten P-Reserven in absehbarer Zeit ausgebeutet sein wird (siehe Tabelle 13).

**Tabelle 13: Wissenschaftliche Artikel, die sich auf USGS-Daten vor dem Jahr 2011 beziehen, die angewandte Methode zur Berechnung der Reserven-Reichweite und ihre Ergebnisse**

Quelle	USGS-Daten	Methode	Ergebnisse
Déry und Anderson (2007)	2007	Hubbert-Kurve	Welt P-Peak vor dem Jahr 2000.
Ward (2008)	2008	Hubbert-Kurve	"einfach" abbaubare Reserven haben schon im Jahr 1990 gepeakt, "schwierig" abbaubare werden circa im Jahr 2141 den Peak erreichen.
Cordell et al. (2009)	2008	Hubbert-Kurve	P-Reserven in den nächsten 50-100 Jahren aufgebraucht, P-Peak im Jahre 2030.
Schröder et al. (2010)	2008	-	beziehen sich auf Cordell et al. (2009), erwähnen aber, dass es kritische Stimmen zu ihrer These gäbe.
Vaccari und Strigul (2011)	2010	R/C-Verhältnis	99 Jahre Reichweite für die Reserven (einfach verfügbar), 281 Jahre Reichweite für die Reserven-Basis (teurer, schwerer abbaubar).
Sverdrup und Ragnarsdottir (2011)	2008	nicht klar	Phosphorgestein-Reserven mit hohen P-Gehalten gehen im Jahr 2040, die mit tiefen Gehalten im Jahr 2340 und die mit "ultra" tiefen Gehalten im Jahr 3100 zu Ende. Die genauen Gehalte sind nicht definiert.
Fixen und Johnston (2012)	2009	R/C-Verhältnis	93 Jahre Reichweite für globale Reserven, 291 für die Reserven-Basis. Grundlage sind Produktionsraten aus den Jahren 2007 und 2008.
Butusov und Jernelöv (2013)	<2011	Hubbert-Kurve	Peak-Phosphor im Jahr 2030.
Odegard und van der Voet (2014)	2009	Eigene Methode	Je nach IPCC-Szenario reichen die Reserven für 135 (A1), 176 (A2), 285 (B1) oder 240 (B2) Jahre.

Aus Tabelle 13 ist ersichtlich, dass viele Studien, die sich auf USGS-Daten vor dem Jahr 2011 beziehen, zum Schluss kommen, dass die leicht abbaubaren P-Reserven entweder ihren Peak schon erreicht haben (Déry & Anderson, 2007; Ward, 2008), oder ihn in den nächsten 20 bis 30 Jahren erreichen werden (Butusov & Jernelöv, 2013; Cordell et al., 2009; Schröder et al., 2010).

Diese Artikel verwenden alle die Hubbert-Kurve-Modellierung für die Berechnung des Phosphor-Peaks. Studien, die das simplere R/C-Verhältnis als Methode benützen, berechnen keinen Peak, sondern das Ende der momentan als Reserven deklarierten P-Ressourcen (Fixen & Johnston, 2012; Vaccari & Strigul, 2011). Sie kommen dabei auf eine Neigung der P-Reserven im Jahre 2100. Beim Artikel von Sverdrup und Ragnarsdottir (2011) wird nicht klar ersichtlich, welche Methode angewandt wird, sie berechnen aber lediglich Reichweiten und keinen Peak. Odegard und van der Voet (2014) haben eine Fussabdruck-Methode für ihre Prognosen angewandt. Ihre Voraussagen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

### Prognosen basierend auf USGS-Reports ab 2011

Folgende Artikel beziehen sich auf die USGS-Daten ab dem Jahr 2011 und kommen daher mehrheitlich zum Schluss, dass der einfach verfügbare Anteil der weltweiten P-Reserven nicht so bald aufgebraucht sein wird (siehe Tabelle 14).

**Tabelle 14: Wissenschaftliche Artikel, die sich auf USGS-Daten ab dem Jahr 2011 beziehen, die angewandte Methode zur Berechnung der Reserven-Reichweite und ihre Ergebnisse**

Quelle	USGS-Daten	Methode	Ergebnisse
Cooper et al. (2011)	2011	R/C-Verhältnis	Die Reserven reichen mit der Produktionsrate aus dem Jahr 2011 noch 370 Jahre.
Cordell, White und Lindström (2011)	2011	Hubbert-Kurve	Möglicher Peak zwischen 2051 und 2092, wobei 2070 in der Mitte liegt.
Scholz und Wellmer (2013)	2011	-	In naher Zukunft keinen Peak zu erwarten.
Kauwenbergh et al. (2013)	2011	R/C-Verhältnis	300 Jahre Reichweite mit Produktionsraten aus dem Jahr 2011.
Mohr und Evans (2013)	2012	Hubbert-Kurve	Je nach Szenario wird der Peak zwischen 2011 und 2118 erreicht sein.

Nach der massiven Erhöhung der Reserven Marokkos im Jahre 2011 wurden auch alle Prognosen nach oben korrigiert (siehe Tabelle 14). Die Ergebnisse der diversen Studien können aufgrund der unterschiedlich angewendeten Methoden nicht direkt verglichen werden. Trotzdem sind markante Unterschiede in den Prognosen, die dieselben Methoden benützen, ersichtlich.

Die Prognosen, die das R/C-Verhältnis verwenden, wurden von 93 bis 99 Jahren (Fixen & Johnston, 2012; Vaccari & Strigul, 2011) aufgrund der neuen USGS-Daten nach 2011 auf über 300 Jahre erhöht (Cooper et al., 2011; Kauwenbergh et al., 2013). Die Prognosen, welche einen P-Peak mittels Hubbert-Kurve voraussagen, waren schon vor dem USGS-Report aus dem Jahr 2011 ziemlich unterschiedlich, da sie auf verschiedenen Datengrundlagen basieren. Wo einige Studien zum Schluss kommen, dass der Peak bereits vorüber ist (Déry & Anderson, 2007; Ward, 2008), geben die meisten anderen Studien vor dem USGS-Report 2011 das Jahr 2030 als Peak-Jahr an (Butusov & Jernelöv, 2013; Cordell et al., 2009; Schröder et al., 2010). Cordell (2009) korrigierte ihre Voraussage im Jahr 2011 vom Peak im Jahr 2030 auf den Zeitraum zwischen 2051



und 2092 (Cordell et al., 2011). Mohr und Evans (2013) kommen aufgrund der USGS-Daten aus dem Jahr 2012 je nach Szenario zu einem Peak zwischen 2011 und 2118.

### 4.2.3 Kalium-Reserven

Wie auch bei Schätzungen zu den P-Reserven basieren die Annahmen der Reichweite der K-Reserven vor allem auf Daten des USGS (Al Rawashdeh & Maxwell, 2014; Ciceri et al., 2015; Fixen & Johnston, 2012; Manning, 2015). Aus diesem Grund wird hier, wie beim P, die Geschichte der Reserven-Entwicklung gemäss USGS zusammengefasst.

Da die in dieser Arbeit zitierten Studien zur Reichweite der K-Reserven in der überwiegenden Mehrheit (Al Rawashdeh & Maxwell, 2014; Ciceri et al., 2015; Fixen & Johnston, 2012; Manning, 2015) die Methode des R/C-Verhältnisses benutzen, wird auf eine erneute Auflistung verschiedener Schätzungsmethoden verzichtet (für eine detaillierte Beschreibung der Methoden siehe Kapitel 4.2.2).

#### Entwicklung der Reserven-Schätzung

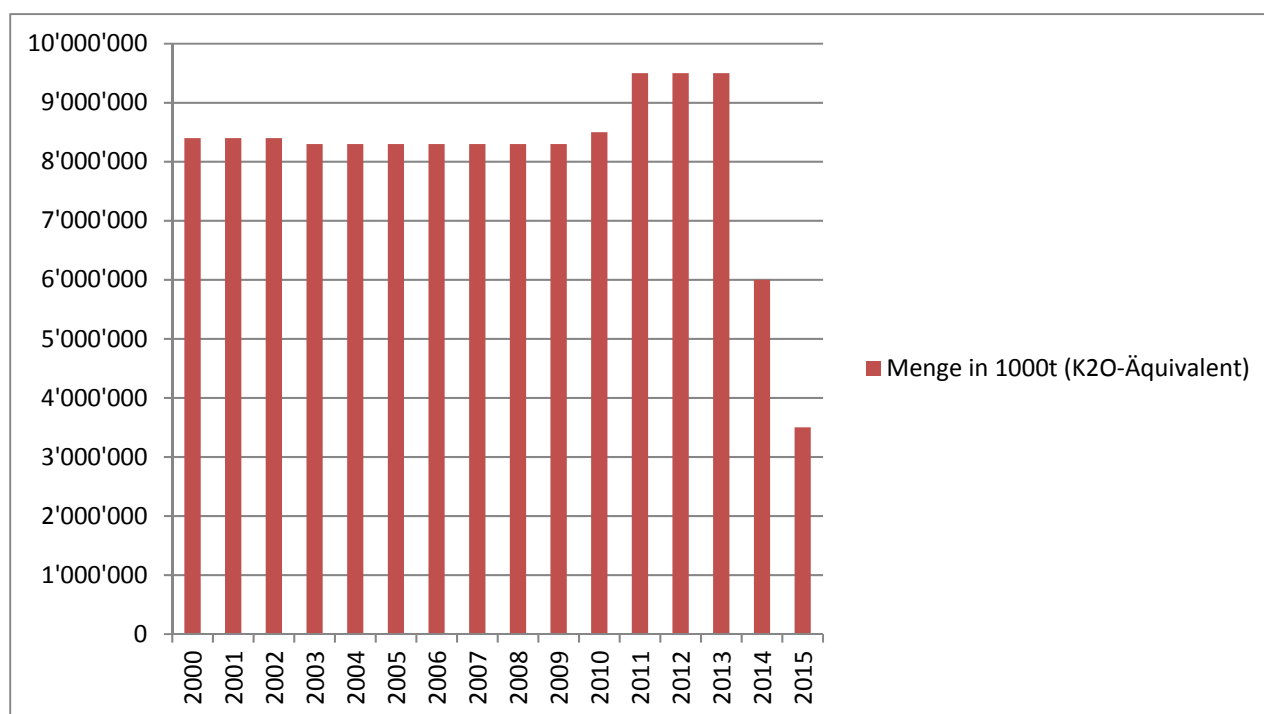


Abbildung 5: Diagramm der Entwicklung der Kalium-Reserven-Schätzung (Jasinski, 2009b, 2010b, 2011b, 2012b, 2013b, 2014b, 2015b; Kostick, 2006, 2007; Ober, 2008; Searls, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005)

Während die Zahlen der P-Reserven in den letzten Jahren massiv nach oben korrigiert wurden, entwickelten sich die Schätzungen der weltweiten K-Reserven gegenteilig (Manning, 2015). Nachdem die vom USGS publizierten Zahlen zwischen den Jahren 2000 und 2009 konstant auf 8.3 Millionen Kilotonnen lagen, wurden sie 2010 auf 8.5 und 2011 auf 9.5 Millionen Kilotonnen korrigiert (siehe Abbildung 5). Der Anstieg im Jahr 2011 ist hauptsächlich auf eine Erhöhung der Reserven

in Russland zurückzuführen (Jasinski, 2010b, 2011b). Schon damals wurde darauf hingewiesen, dass die Daten der russischen Reserven möglicherweise nicht mit den Daten der anderen Länder vergleichbar sind (Jasinski, 2011b). Zwei Jahre später, 2014, fallen die Schätzungen massiv kleiner aus als in den vorangegangenen Jahren (Jasinski, 2014b). Die Korrektur von 9.5 auf 6 Millionen Kilotonnen liegt hauptsächlich an der Verringerung der kanadischen und russischen Reserven (siehe Tabelle 15). In Russland wird neu das JORC-Verfahren anstatt des Russischen angewendet, in Kanada wird nicht wie bisher die Menge an Erz-Reserven, sondern der effektive  $K_2O$ -Gehalt als Grundlage verwendet (Jasinski, 2014b). Bei Weissrussland wird anstatt des  $K_2O$ -Äquivalents die gesamte förderbare Erz-Menge angegeben (Jasinski, 2014b). Im USGS-Report aus dem Jahr 2015 werden die Reserven definitiv unterteilt in förderbares Erz und in  $K_2O$ -Äquivalente (Jasinski, 2015b). Dadurch mussten die Reserven an  $K_2O$ -Äquivalenten für Weissrussland und einige andere Länder wieder nach unten korrigiert werden (siehe Tabelle 15). Dadurch sanken die Reserven auf 3.5 Millionen Kilotonnen.

**Tabelle 15: Länder mit den grössten Veränderungen der  $K_2O$ -Reserven-Schätzungen zwischen 2013 und 2015 (Jasinski, 2013b, 2015b)**

Land	2013 (in 1000t)	2014 (in 1000t)	2015 (in 1000t)
Weissrussland	750'000	3'300'000	750'000
Kanada	4'400'000	1'000'000	1'100'000
Russland	3'300'000	600'000	600'000
restliche Länder	1'050'000	1'100'000	550'000
Total	9'500'000	6'000'000	3'000'000

## Prognosen

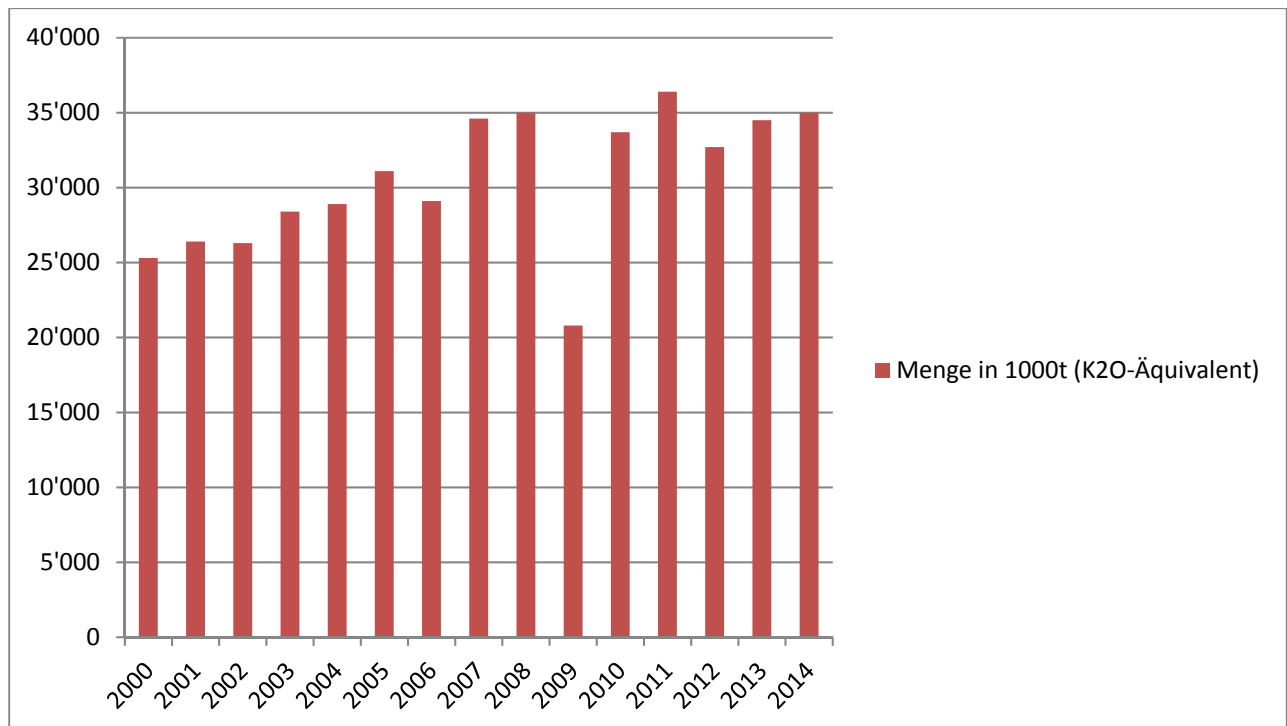
Abgesehen von den Autoren Odegard und van der Voet (2014) wenden alle hier erwähnten AutorInnen die Schätzungsmethode des R/C-Verhältnisses an, um die Reserven-Reichweite zu berechnen. Bei dieser Methode wird die aktuelle Reserven-Schätzung durch die momentane Produktionsmenge geteilt, wobei eine Anzahl Jahre resultiert, die angibt, für welchen Zeitraum die Reserven bei gleichbleibender Produktion noch reichen würden (mehr dazu siehe Kapitel 4.2.2). In Tabelle 16 sind die untersuchten Studien mit ihren Reserve-Schätzungen zusammengefasst. Die Zahlen werden teils wie in Tabelle 16 explizit in den Artikeln aufgelistet, teils auch aus Aussagen hergeleitet.

Tabelle 16: Zusammenfassung verschiedener Schätzungen der Kalium-Reserven-Reichweite

Quelle	USGS-Report	Reserven (1'000 t)	Abbau pro Jahr	Änderung des Verbrauchs?	ca. Reichweite (Jahre)
Roberts (2008)	2008	8'300'000	33'000	Nein	250
Fixen und Johnston (2012)	2009	8'300'000	35'000	Nein	237
Odegard und van der Voet (2014)	2009	8'300'000	? Ja		53, 59, 86, 105
Ciceri et al. (2015)	2011	9'500'000	20'800	Nein	457
Sutton et al. (2013)	2012	9'500'000	37'000	Nein	257
Al Rawashdeh und Maxwell (2014)	2013	9'500'000	34'000	Nein	279
Manning (2015)	2014	6'072'000	34'636	Nein	175
Mariani (2015) (ohne Zunahme)	2015	3'500'000	34'500	Nein	101
Mariani (2015) (mit 3% Zunahme pro Jahr gemäss Jasinski (2014b))	2015	3'500'000	34'500+	Ja (3% Zunahme/Jahr)	47

Die untersuchten Studien lassen sich gemäss ihren verschiedenen Schätzungen einordnen. Diese hängen stark davon ab, auf welchen USGS-Report sich die Studie bezieht.

Ciceri et al. (2015) kommen als einzige Autoren auf eine Reichweite von 457 Jahren, da sie für ihre Berechnung die Produktionsrate des Jahres 2009 voraussetzen (20'800 Kt/Jahr) (Jasinski, 2011b). Die Produktion von  $K_2O$  ist aber im Vergleich zu den Jahren 2008 und 2010 im Jahre 2009 stark eingebrochen (siehe Abbildung 6). Dies erklärt, warum Sutton et al. (2013), Al Rawashdeh und Maxwell (2014) sowie Fixen und Johnston (2012) mit den Produktionsraten zwischen 2010 und 2013, Roberts (2008) mit der Produktionsrate von 2008, auf ungefähr 250 Jahre Reichweite der Reserven kommen. Spätere Schätzungen prognostizieren deutlich weniger Jahre Reichweite. Manning (2015) kommt mit den Daten vom USGS-Report 2014 noch auf 175 Jahre Reichweite, eigene Berechnungen des Autors dieser Arbeit ergeben, basierend auf den Daten des USGS-Reports 2015, 101 Jahre Reichweite (siehe Tabelle 16).



**Abbildung 6: Diagramm der weltweiten Kalium-Produktionsmenge zwischen 2000 und 2014 (Zahlen für 2014 geschätzt) (Jasinski, 2009b, 2010b, 2011b, 2012b, 2013b, 2014b, 2015b; Kostick, 2006, 2007; Ober, 2008; Searls, 2002, 2003, 2004, 2005)**

Alle genannten Berechnungen beziehen sich auf statische Abbau-Raten pro Jahr, was der Methode des R/C-Verhältnisses entspricht. Werden die Daten des USGS-Reports 2015 herangezogen und eine jährliche Zunahme der Produktion von 3% gemäss Jasinski (2014b) angenommen, reichen die Reserven noch 47 Jahre, bis sie komplett aufgebraucht sind (siehe Anhang 1).

Odegard und van der Voet (2014) haben als einzige Autoren eine komplexere Methode zur Schätzung der Reichweite der K-Reserven verwendet (siehe Kapitel 4.2.2). Sie kommen je nach IPCC-Szenario auf ungefähr 50 bis 100 Jahre Reichweite (siehe Tabelle 17).

**Tabelle 17: Hauptunterschiede der vier IPCC-Szenarien und ihre Kalium-Reichweite (Odegard & van der Voet, 2014). Die verschiedenen Szenarien sind in Tabelle 12 genauer beschrieben.**

Kategorie (2050)	A1 (Überfluggesellschaft)	A2 (volle Welt)	B1 (vegetarische Welt)	B2 (low-input Welt)
Reichweite K-Reserven (Jahre nach 2014)	53	59	105	86

## 4.3 Umweltbelastungen bei der Herstellung

In den folgenden Kapiteln werden mögliche Umweltbelastungen bei der Produktion von NPK-Düngern beschrieben.

Die beim Abbau und der Weiterverarbeitung von K und P entstehenden Umweltschäden werden teilweise in den Medien untersucht und beurteilt (siehe Burger, 2015; Lienhard, 2006; Mayer, 2006; ORF, 2015; Stauffer, 2014)

### 4.3.1 Umweltauswirkungen bei der Stickstoffdünger-Produktion

Neben dem durch die Verbrennung von Methan entstehenden CO<sub>2</sub>, verursacht die Herstellung von Ammoniak aus N und H im Haber-Bosch-Prozess Abfälle in Form von nicht mehr brauchbaren metallischen Katalysatoren (Raouf, Nabizadeh, & Jafarzadeh, 2005).

Raouf et al. (2005) untersuchten während dreier Jahre eine Ammoniak-Produktionsfabrik im Iran. Sie kommen zum Schluss, dass 80% der jährlich generierten 1000 Tonnen fester Abfälle als gefährlich für die Umwelt einzustufen sind, da sie Metalle wie Kobalt, Nickel, Chrom und Molybdän beinhalten. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurden über 85% der Abfälle auf dem Gelände der Fabrik gelagert. Ob dadurch Umweltbelastungen verursacht werden, wurde nicht untersucht.

Auf die globalen Umweltauswirkungen der Produktion von CO<sub>2</sub> durch die Verbrennung von Erdgas oder Kohle wird hier nicht weiter eingegangen, da durch jede Verbrennung fossiler Brennstoffe CO<sub>2</sub> entsteht.

Konkrete Umweltauswirkungen oder die Gefahr von Umweltverschmutzungen lassen sich nicht finden (Billen, Garnier, & Lassaletta, 2013; Galloway, 2013; Raouf et al., 2005; Smil, 2001).

### 4.3.2 Umweltauswirkungen bei der Phosphordünger- Produktion

Die direkt mit dem P-Abbau und der Weiterverarbeitung zusammenhängenden Umweltbelastungen beschränken sich meistens auf die Minen-Areale (Syers et al., 2011). Dies hat insbesondere vor allem damit zu tun, dass sich die Weiterverarbeitung des Phosphat-Gesteins meistens direkt neben den Minen befindet (Lottermoser, 2010).

Gemäss Butusov und Jernelöv (2013) bringt der P-Abbau und dessen Weiterverarbeitung zu Dünger vor allem folgende lokale Umweltprobleme mit sich:

- Ausbeutung und teilweise Erschöpfung der natürlichen Phosphatgesteins-Vorkommen
- Zerstörung von grossen Flächen um die P-Minen herum (siehe Abbildung 7), inklusive grosser Mengen an Abraum und verschmutztem Wasser

- Erhöhung bestimmter Schwermetall-Elemente wie beispielsweise Cadmium und radioaktiv strahlender Elemente in der Umwelt



Abbildung 7: Phosphor-Mine in Togo (Butusov & Jernelöv, 2013)

80% des Phosphors für Düngemittel wird aus marinen Sedimenten gewonnen. Diese werden hauptsächlich im Tagebau gefördert, indem die ersten 5 bis 10 Meter der Erdoberfläche abgetragen werden (Butusov & Jernelöv, 2013). Dies bringt im Gegensatz zu Minen unter der Erdoberfläche grosse landschaftliche Verwüstungen mit sich. Offshore-Mining wird hier nicht behandelt, da es momentan erst in der Projektphase steckt. Es wird aber befürchtet, dass dabei ebenfalls Umweltschäden verursacht werden (Scholz & Wellmer, 2013).

Um an das phosphorhaltige Gestein zu kommen, muss das darüber oder davor liegende Gestein abgetragen werden. Diese Abfälle werden normalerweise nicht weit von der Mine als Hügel aufgeschichtet, haben oft eine tiefe Konzentration an Radionukliden und Schwermetallen und sind daher oft keine Gefahr für die Umwelt. Sie werden teilweise für das Wiederauffüllen der Minen oder für Renaturierungen verwendet (Lottermoser, 2010).

Das geförderte Erz wird noch vor der Weiterverarbeitung von nicht gewünschtem Gestein getrennt und konzentriert. Die dabei entstehenden Gesteins-Abfälle werden entweder wieder in die Minen gefüllt oder in Becken aufgefangen, wo sie sich am Grund ablagern (Lottermoser, 2010).

Durch die Weiterverarbeitung im Nassverfahren zu Phosphorsäure entsteht Phosphorgips. Da das zusätzlich anfallende Abwasser oft mit Phosphorgips zusammen entsorgt oder gelagert wird, werden diese beiden Abfälle in der vorliegenden Arbeit zusammen behandelt und als Phosphorgips

bezeichnet. Phosphorgips ist für das grösste Abfall-Volumen bei der Phosphor-Düngerproduktion verantwortlich (Lottermoser, 2010). Obwohl es dokumentierte Fälle von Umweltverschmutzung aus Minenabfällen vor der Weiterverarbeitung gibt (Butusov & Jernelöv, 2013), übersteigt die Zahl der Dokumentationen von Umweltschäden durch Phosphorgips diese bei weitem (Aoun, El Samrani, Lartiges, Kazpard, & Saad, 2010; Butusov & Jernelöv, 2013; Gaudry et al., 2007; Lottermoser, 2010; Othman & Al-Masri, 2007; Rentería-Villalobos, Vioque, Mantero, & Manjón, 2010; Wali, Colinet, Khadhraoui, & Ksibi, 2013). Aus den genannten Gründen werden dem Phosphorgips die folgenden Kapitel gewidmet.

## Phosphorgips

Um aus dem konzentrierten Phosphorgestein Phosphorsäure herzustellen, wird das Gestein mit Schwefelsäure in Verbindung gebracht. Die chemische Formel lautet wie folgt (Lottermoser, 2010):

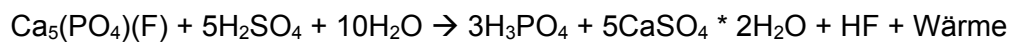


Abbildung 8: Chemische Formel für die Herstellung von Phosphorsäure aus Phosphorgestein (Lottermoser, 2010)

Die Formel lässt erkennen, dass neben Phosphorsäure ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) auch Kalzium-Sulfat-Kristalle oder Gips ( $5\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) und Hydrofluorid-Säure (HF) entstehen.

Das so entstehende Abfallprodukt wird Phosphorgips genannt und besteht aus über 90% aus Kalzium-Sulfat-Kristallen (Berish, 1990, zitiert nach Tayibi et al., 2009), enthält allerdings auch verschiedene andere Abfallprodukte aus dem verwendeten Phosphorgestein. Darunter finden sich unter anderem nicht reagiertes Phosphorgestein, organische Materie, diverse potentiell toxische Schwermetalle und Radionuklide. Bei den Radionukliden dominiert Radium (Lottermoser, 2010; Tayibi et al., 2009). Der Gehalt an radioaktiv strahlenden Elementen (Tayibi et al., 2009) und Schwermetallen (Lottermoser, 2010) im Phosphorgips variiert stark aufgrund der Herkunft des Phosphorgesteins.

Pro Tonne verarbeiteter Phosphorsäure fallen fünf Tonnen Phosphorgips an, der oft in grossen Hügeln oder Dämmen unter freiem Himmel gelagert wird (siehe Abbildung 9) (Lottermoser, 2010). Vom anfallenden Phosphorgips werden nur 15% wiederverwendet (Pérez-López, Álvarez-Valero, & Nieto, 2007). Ein Teil des recycelten Phosphorgipses wird wieder in der Landwirtschaft ausgebracht (Papastefanou, Stoulos, Ioannidou, & Manolopoulou, 2006).



Abbildung 9: Phosphor-Gips-Hügel in Russland (Butusov & Jernelöv, 2013)



## **Phosphorgips: Umweltschäden**

Phosphorgips wird in den meisten Fällen direkt neben den Produktionsanlagen für Phosphordünger gelagert (Lottermoser, 2010). Wie erwähnt treten potentielle Umweltschäden meistens in der Umgebung der Minen und Produktionsstätten auf. Wie im vorigen Kapitel bereits erwähnt enthält Phosphorgips oft Schwermetalle und radioaktiv strahlende Elemente. Für die Gefahr von Umweltschäden ist besonders zentral, dass verschiedene Schwermetalle und Radionuklide im Phosphorgips mobiler als in Gesteinsform sind. Ausserdem sind sie im Gegensatz zur Gesteinsform oft an organische Komplexe gebunden. Dadurch können diese Stoffe einfach ausgewaschen werden und sind überdies bioverfügbar, wodurch sie von Lebewesen aufgenommen werden können (Pérez-López et al., 2007).

Wie die Stoffe aus den Phosphorgips-Lagern in die Umwelt gelangen und welche Umweltgefahren von diesen ausgehen, listet Lottermoser (2010) in folgenden Punkten auf:

- Atmosphärische Emissionen von Radon- und Fluorverbindungen.
- Durch das Zusammenbrechen von Lager-Hügeln und -Dämmen können grosse Mengen an Phosphorgips in lokale Ökosysteme gelangen.
- Wenn die Phosphorgips-Lager weder auf einer undurchlässigen Schicht erstellt werden noch das Sickerwasser aufgefangen wird, besteht die Gefahr der Kontamination von Grund- und Oberflächenwasser durch Auswaschung gewisser toxischer Elemente. Unter anderem können starke Säuren, Phosphat, Fluor, Sulfat, Schwermetalle und Radionuklide ausgewaschen werden.
- Hohe Uran- und Thorium-Konzentrationen können dazu führen, dass der Phosphorgips bei der Lagerung auf seine Radioaktivität überwacht werden muss.

## **Beispiele befürchteter oder realer Umweltschäden**

In Tabelle 18 sind konkrete Umweltschäden aus verschiedenen Ländern aufgelistet. Die grösste Anzahl von Umweltbelastungen erfolgt durch die unsachgemässe Lagerung von Phosphorgips (Aoun et al., 2010; Gusev, 2006; Lottermoser, 2010; Pérez-López et al., 2007; Rentería-Villalobos et al., 2010). Zusätzlich gibt es einige Fälle, in denen Phosphorgips und andere Abfälle der Minen oder Düngemittelfabriken direkt ins Meer eingeleitet werden (Gaudry et al., 2007; Ghandi, Tchangbedji, Killi, Baba, & Abbe, 2006). Butusov und Jernelöv (2013) listen keine konkrete Verschmutzung auf, kritisieren aber, dass die Minenbetreiberin Mosaic in Florida kein Konzept hat, wie mit den Abfällen der Betriebe umzugehen ist. In diesem Zusammenhang kann darauf verwiesen werden, dass Lottermoser (2010) zahlreiche Fälle in Florida dokumentiert, in denen Abfälle von Phosphorminen und Phosphordüngerfabriken massive Umweltschäden verursacht haben.



**Tabelle 18: Befürchtete oder reale Umweltverschmutzungen durch Phosphor-Minen und -Fabriken**

Land	Quelle	Verschmutzung	Ursachen
Libanon	Aoun et al. (2010)	Verschmutzung des Bodens in der Umgebung einer Phosphor-Düngemittelfabrik durch diverse Schwermetalle.	Transport und Speicherung von Rohmaterial, Freisetzung von Phosphorgips.
Marokko	Gaudry et al. (2007)	Starke Schwermetall-Belastung in Algen bis 6 Kilometer von der Küste entfernt vor zwei Arealen mit Phosphordüngerfabriken.	Durch ein Abflussrohr ins Meer geleiteter Phosphorgips.
Spanien	Rentería-Villalobos et al. (2010)	Gefahr von Umweltverschmutzung um Phosphordünger-Fabriken in Huelva (allerdings nicht konkret nachgewiesen).	Unter freiem Himmel gelagerter Phosphorgips.
	Pérez-López et al. (2007)	Schwermetalle und Radionuklide werden in die Umwelt zweier Phosphorgips-Hügel in Huelva (40ha und 60ha) ausgewaschen.	Der Verwitterung ausgesetzter Phosphorgips-Hügel.
	Lottermoser (2010)	227'000 m <sup>3</sup> Saure Flüssigkeit aus Phosphorgips-Damm gelangt in einen lokalen Fluss in Huelva.	Phosphorgips-Damm während eines Sturms zerstört.
Syrien	Othman & Al-Masri (2007)	Erhöhte Werte von Radionukliden im Boden, im Wasser, in der Luft und in Pflanzen in der Umgebung von drei Phosphorminen.	Verladung und Verarbeitung von Phosphaterz.
Tunesien	Wali et al. (2013)	Erhöhte Schwermetall-Belastung im Boden um einen Phosphorgips-Lagerhügel.	Erosion und Auswaschung der Phosphorgips-Lager.
Togo	Gnandi et al. (2006)	Akkumulation von diversen Schwermetallen in Fischen, Shrimps und Krabben im Meer vor einer Phosphor-Dünger-Fabrik.	Direkte Einleitung von Minen- und Fabrik-Abfällen ins Meer.
USA	Lottermoser (2010)	In verschiedenen Jahren gelangen grosse Mengen in lokale Bäche, Flüsse und Mooregebiete, was teilweise Fischsterben und die Zerstörung der Ökosysteme mit sich brachte.	Zusammenbrechen von Phosphorgips-Lagern und –Dämmen durch Stürme oder ohne direkte äussere Einwirkung.
	Butusov und Jernelöv (2013)	Die Firma Mosaic, die in Florida den grössten Teil der Phosphordünger-Fabriken und –Minen besitzt, hat keine Strategie, wie mit den Umweltschäden dieser Industrie umzugehen ist.	
Weiss-russland	Gusev (2006)	Belastung der Oberflächengewässer, des Grundwassers und der Böden in der Umgebung einer Phosphor-Dünger-Fabrik mit Sulfaten, Fluoriden und Phosphaten.	80ha grosser Phosphorgips-Hügel.

### 4.3.3 Umweltauswirkungen bei der Kaliumdünger- Produktion

Umweltbelastungen von Pottasche-Minen und -Mühlen treten vor allem lokal auf. Gemäss Ripley et al. (1996) treten insbesondere folgende Belastungen auf:

- Oberflächenstörungen durch Abfälle
- Belastung des Bodens und Verringerung der Wasserqualität durch Salzpartikel
- Landsenkungen
- Luftbelastungen

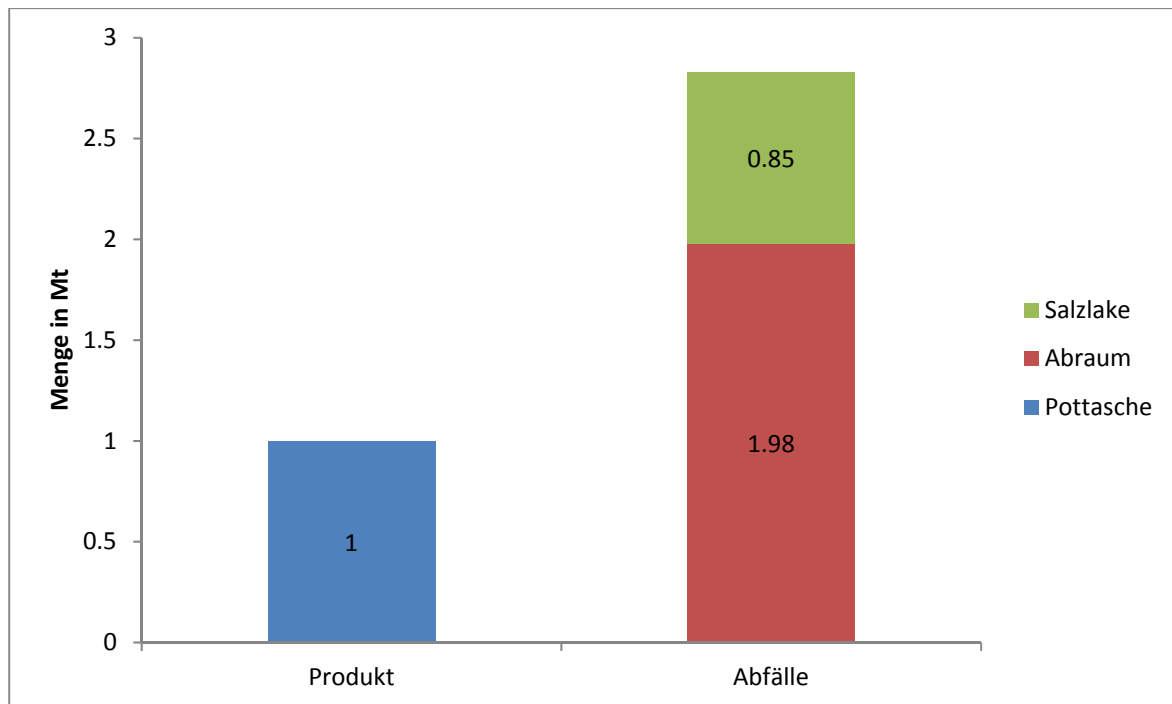


Abbildung 10: Diagramm: Menge an Abfallerz und Salzlake im Verhältnis zur geförderten Pottasche (Strathdee, 1994, zitiert nach Ripley et al., 1996)

Die Haupt-Abfälle von Pottasche-Minen sind Salzlaken und Abfallerz (Lottermoser, 2010). Die Salzlaken haben oft sehr hohe Salzgehalte (Ahmad & Baddour, 2014). Pro Mt Pottasche fallen 1.98 Mt Abfallerz und 0.85 Mt Salzlake an (siehe Abbildung 10) (Strathdee, 1994, zitiert nach Ripley et al., 1996).

Ein grosser Teil der Salzlake wird in Becken gelagert oder ins Meer geleitet. Der Rest wird entweder in ein Aquifer unter der Mine oder in die leeren Teile der Mine zurückgepumpt (Lottermoser, 2010; Ripley et al., 1996). Die Entsorgung im Meer kann für gewisse Organismen tödlich sein, da sie nur an einen bestimmten Salz-Bereich gewohnt sind (Hutcheson, 1983, zitiert nach Ripley et al., 1996; Ahmad & Baddour, 2014). Ausserdem enthalten die Salzlaken teilweise auch für Meereslebewesen gefährliche Chemikalien (Ahmad & Baddour, 2014).

Da sich besonders in Kanada die Pottasche-Minen in Landwirtschaftsgebiet befinden, liegt dort die grosse Herausforderung darin, dass die Salzlaken der Minen nicht in Gewässer oder umliegende Böden gelangen (Ripley et al., 1996).

Die Gefahr von Landsenkung ist bei Pottasche-Minen relativ gross, da das Pottasche-Gestein von weichem Gestein überlagert wird. Die Gefahr besteht nicht nur während der direkten Extraktion, sondern auch danach, falls eindringendes Grundwasser das Gesteinsmaterial auflöst. Das Problem tritt vor allem bei Minen auf, die nahe an der Oberfläche und nicht bereits wassergesättigt sind. Teilweise wird das Abfallerz am Ende der Minentätigkeit wieder in die Mine zurück gefüllt, was das Risiko von Landsenkungen vermindert (Ripley et al., 1996).

Die Belastung der Luft durch Pottasche-Minen ist relativ gering und kann gut kontrolliert werden. Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen sind nicht bekannt, es kommen aber wetterabhängig teilweise Schäden bei Bäumen in der Umgebung der Minen vor (Ripley et al., 1996).

### Beispiele befürchteter oder realer Umweltschäden

Tabelle 19 listet befürchtete oder reale Umweltschäden auf. Vor allem im grossen K-Produzenten Kanada wird die Versalzung des Grundwassers befürchtet (Saskatchewan ECO-Network, 2001; Vonhof, 1975). Bereits real sind die Auswirkungen in Spanien und Russland, wo Flüsse durch zu hohe Salzeinträge verschmutzt wurden (Gorostiza Langa, 2014; Lepikhin, Lyubimova, Pshakova, & Tiunov, 2012). Die Situation des Flusses Werra in Deutschland hat sich zwar verbessert (Bäthe & Coring, 2011), gilt aber nach wie vor als kritisch (Braukmann & Böhme, 2011).

**Tabelle 19: Befürchtete oder reale Umweltverschmutzungen durch Kalium-Minen und -Fabriken**

Land	Quelle	Verschmutzung/Befürchtung
Kanada	Vonhof (1975)	Grosse Gefahr von Grundwasserversalzung durch Lagerung von Bergbauabfällen in Saskatchewan (Kanada), wo viel Kalium abgebaut wird.
	Saskatchewan ECO-Network (2001)	Befürchtungen, dass entsorgte Salzlaken in den tieferen Erdschichten das höher gelegene Grundwasser kontaminieren könnten.
Spanien	Gorostiza Langa (2014)	Salzlake-Verschmutzung der Flüsse Cardener und Llobregat.
Russland	Lepikhin, Lyubimova, Pshakova und Tiunov (2012)	Umweltverschmutzung in Form von zu hoher Salzkonzentration im Fluss Kama (Zufluss zur Wolga in Russland).
Deutschland	Bäthe und Coring (2011)	Der Fluss Werra ist durch Abwässer der Pottasche-Industrie belastet, hat sich in den letzten Jahren durch niedrigere Salzgehalte für das Makrozoobenthos verbessert.
	Braukmann und Böhme (2011)	Allerdings konnten typische empfindliche Süsswasserlebewesen noch nicht permanent zurückkommen, da neben den Salzwerten die Kalium- und Magnesiumwerte im Fluss zu hoch sind.

## 4.4 Energieverbrauch bei der Herstellung von NPK-Düngern

Es kann angenommen werden, dass fossile Brennstoffe nicht mehr lange verfügbar sind, oder zumindest die einfach erschliessbaren Reserven in naher Zukunft zur Neige gehen (Mohr, Wang, Ellem, Ward, & Giurco, 2015; Owen, Inderwildi, & King, 2010; Shafiee & Topal, 2008). Werden fossile Energieträger knapp, wird sich ihr Preis sehr wahrscheinlich stark erhöhen (Lutz, Lehr, & Wiebe, 2012; Owen et al., 2010). Da somit der Energieverbrauch in Zukunft ein Risiko darstellen könnte, wird in diesem Kapitel untersucht, wie viel Energie die Herstellung von NPK-Düngern benötigt.

Ein grosser Teil der in der globalen Landwirtschaft eingesetzten fossilen Energie wird für NPK-Dünger eingesetzt. Von der gesamthaft in der Landwirtschaft eingesetzten fossilen Energie fallen 36% für N-, 3% für P- und 1.7% für K-Dünger an. Der Energiebedarf für die Produktion von Stickstoffdüngern liegt deutlich über dem Input an fossiler Energie für Treibstoffe auf den Farmen (27%)

sowie über der Energie, welche für die Herstellung von landwirtschaftlichen Maschinen aufgewendet wird (15%) (Giampietro, 2002, zitiert nach Bardi et al., 2013). Die Herstellung von Stickstoffdüngern benötigt 1.2% der weltweiten primären Energie (Ahlgren et al., 2010; Motavalli, 2014).

Der Energiebedarf reiner N-, P-, oder K-Dünger und ihren diversen Kombinationen variiert sehr stark. Mit Abstand am meisten Energie benötigen die reinen Stickstoffdünger (Stout, 1990).

In Tabelle 20 wird aufgelistet, wie viel Energie für die Herstellung eines Kilogramms N-, P- oder K-Dünger benötigt wird. Ausserdem wird beschrieben, aus welchen Energiequellen die Energie stammen muss. Die Herstellung von Stickstoffdünger braucht Erdgas (oder Biogas), Kohle, Naphtha oder Schweröl. Ausserdem könnte auch direkt Biomasse durch teilweise Oxidation oder Vergasung verwendet werden. Für die Herstellung von P- und K-Dünger wird vor allem Dampf und Elektrizität benötigt, welches von einer beliebigen Energiequelle stammen kann (Stout, 1990).

**Tabelle 20: Energieaufwand und Quelle für die Herstellung von NPK-Düngern**

	<b>Stickstoff (N)</b>	<b>Phosphor (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>	<b>Kalium (K<sub>2</sub>O)</b>
Energieaufwand pro Kilogramm (Herstellung)*	55-65 MJ	11-18 MJ	7-9 MJ
Energieaufwand pro Kilogramm (Herstellung, Verpackung, Transport, etc.)**	~77 MJ	~13 MJ	~8 MJ
Hauptsächlich verwendete Energiequelle bei der Herstellung	Erdgas, Kohle, Naphtha, Biogas, Schweröl	beliebig	beliebig
* Stout (1990)			
** Leach, 1976, zitiert nach Stout, 1990			

Bei der Synthese von Ammoniak aus N und H ( $N + 3H \rightarrow NH_3$ ) ist vor allem die Herstellung von H sehr energieintensiv, die Synthese von N und H zu Ammoniak benötigt nicht viel Energie (Stout, 1990). Die Energieeffizienz der bestehenden Anlagen zur Herstellung von Stickstoffdüngern hat seit den in Betrieb genommenen Fabriken stark zugenommen (Smil, 2001; Stout, 1990).

Die in Tabelle 20 aufgelisteten Zahlen von Stout (1990) basieren auf dem Energieverbrauch aus dem Jahr 1970, als die Herstellung einer Tonne NH<sub>3</sub> noch 47 MJ Energie benötigte. Gemäss Smil (2001) benötigte die Herstellung einer Tonne Ammoniak im Jahr 2000 noch 26 MJ Energie, wobei das stöchiometrische Minimum bei 20.9 MJ liegen würde. Die Zahlen aus Tabelle 20 müssten also wahrscheinlich noch nach unten korrigiert werden. Die Autoren Ahlgren et al. (2010) rechnen mit 35 MJ pro kg N.

## 4.5 Karten-Recherche

Dieses Kapitel verschafft einen Überblick über die aktuelle Karten-Landschaft zu den Themen natürliche Ressourcen und NPK-Dünger. Die zusammengestellten Karten werden anhand einer Zusammenfassung verglichen und dienen als Ideensammlung für die in dieser Arbeit erstellten Karten.

Für die kartographische Darstellung von Informationen zu N, P und K stellen sich ähnliche Fragen wie bei der Darstellung anderer natürlicher Rohstoffe. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel neben Karten zum Thema NPK-Dünger auch Karten zum Thema natürliche Ressourcen zusammengestellt.

### Karten zum Thema natürliche Ressourcen

Abbildung 11 zeigt eine Weltkarte, auf der die vermuteten und die bestätigten konventionellen Erdöl-Reserven und den bereits verbrauchten Teilen in Kuchendiagrammen dargestellt sind (Harper, 1999, zitiert nach Bentley, 2002). Der Autor der Studie interpretiert das Kuchendiagramm der Welt als tickende Uhr, die bald sechs Uhr anzeigt.

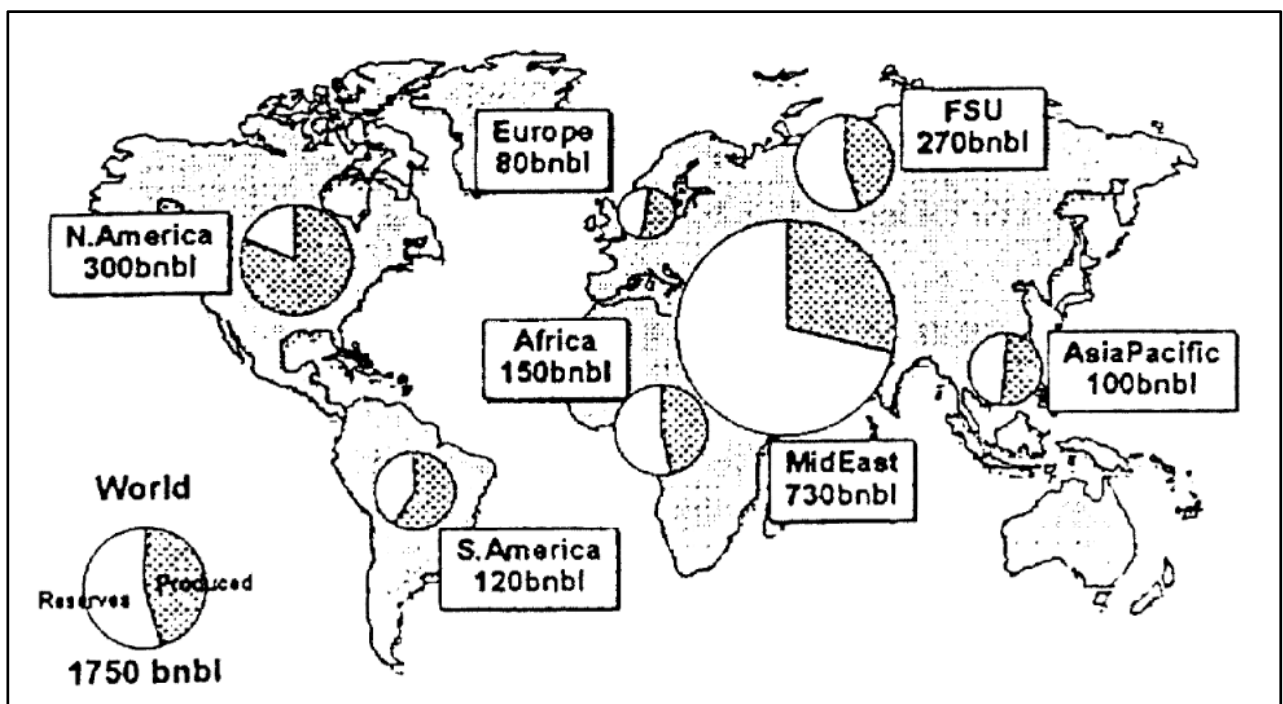


Abbildung 11: Karte mit konventionellen bestätigten oder möglichen Erdöl-Reserven in Weiss und dem schon verbrauchten Teil davon schraffiert (Harper, 1999, zitiert nach Bentley, 2002).

Goldfarb et. al (2005) zeigen in ihrer Karte in Abbildung 12 alle Orte mit Gold-Vorkommen, welche mit Produktion und Ressourcen mehr als 70 Tonnen erreichen. Als Grundgerüst der Karte wird der Hauptgesteinstyp in verschiedenen Farben angezeigt. Jedes Symbol für ein Gold-Vorkommen enthält zusätzlich zur Position auf der Karte zwei Informationen. Die Form des Symbols gibt an, wie alt die Gold-Ablagerung ist, die Farbe gibt an, wie gross das Vorkommen insgesamt ist. Ist die Nummer rot eingefärbt, ist die hinterlegte Information umstritten.

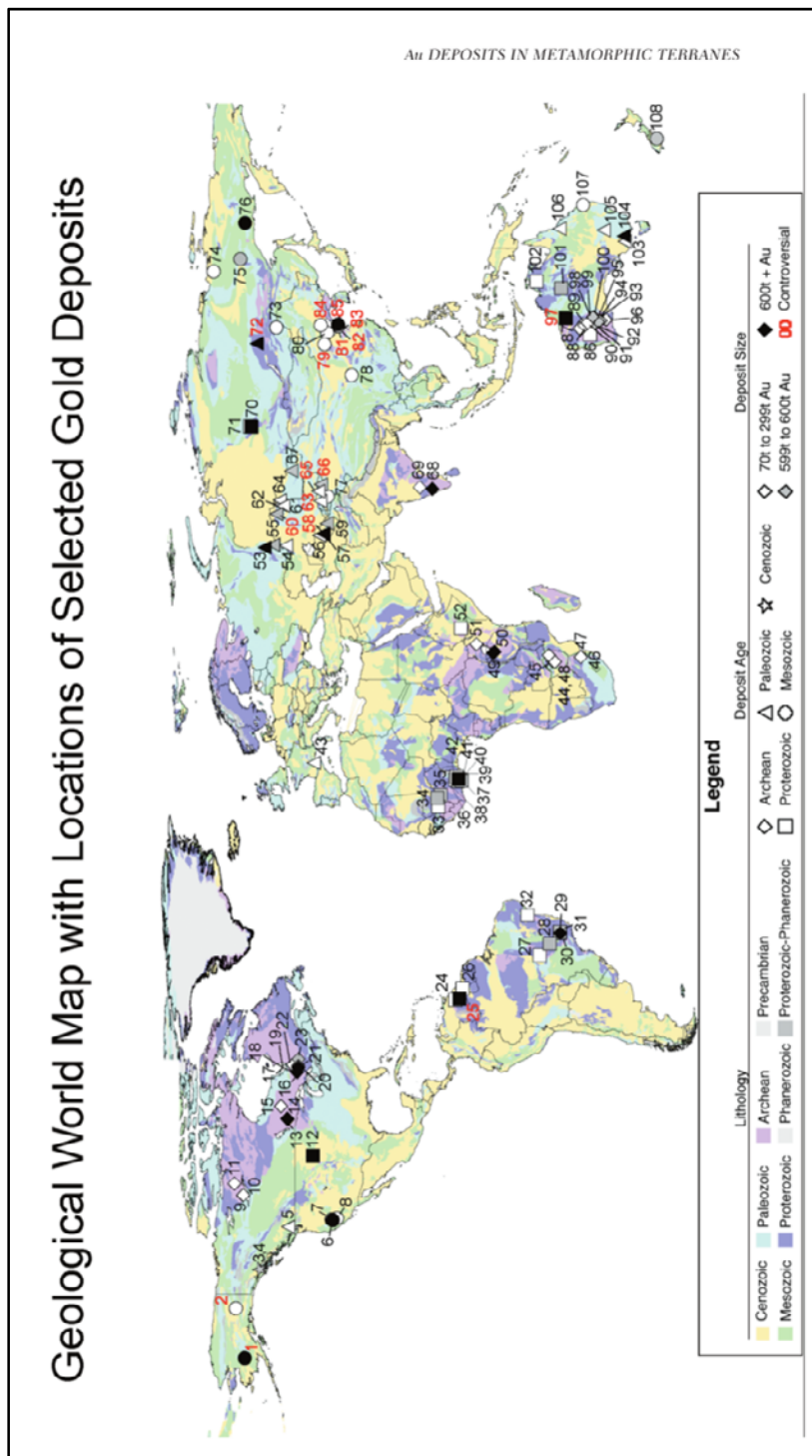


Abbildung 12: Weltkarte mit den Goldlagerstätten, deren Grösse, ihrem Alter und dem Gestein, in dem sie vorkommen (Goldfarb et al., 2005)



Die von Möckli (2008) veröffentlichte Karte in Abbildung 13 zeigt den afrikanischen Kontinent. Die Länder sind mit unterschiedlichen Farben markiert. Symbole zeigen an, welche von einigen ausgewählten natürlichen Ressourcen im jeweiligen Land vorkommen. Bei Erdöl und Erdgas zeigt die Grösse des Balkens wahrscheinlich die Grösse der Reserven an. Im Artikel wird die Grafik nicht genauer erklärt.

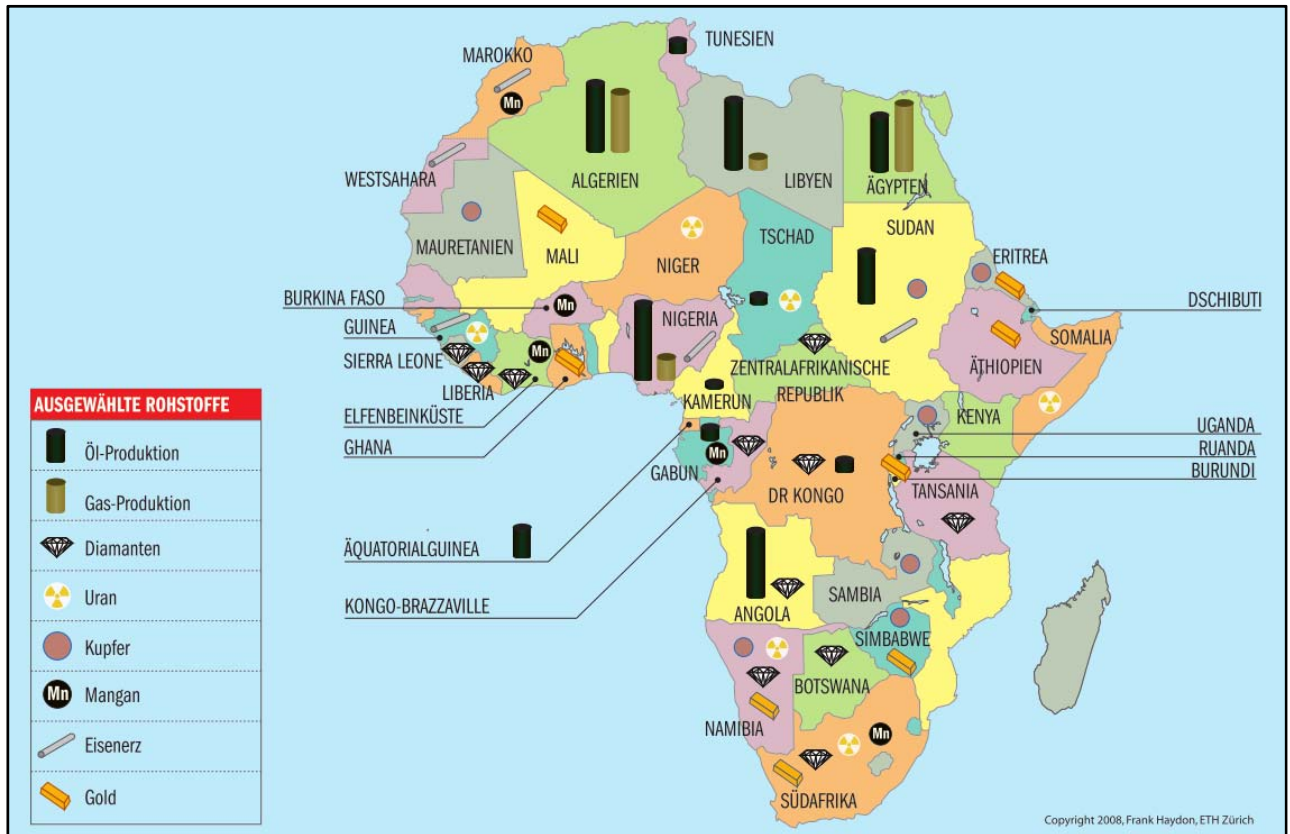


Abbildung 13: Karte vom afrikanischen Kontinent mit der Verbreitung einiger natürlicher Rohstoffe (Möckli, 2008)

In der von Saadat (2007) veröffentlichten Weltkarte werden die Kohleproduzenten im Vergleich zum Top-Produzenten China als rote und gelbe Punkte dargestellt. Der Kohleoutput von China wird mit einem grünen Punkt als 100% dargestellt. Rot markiert werden Produzenten, die 1%, gelb diejenigen, die 10% der von China produzierten Menge herstellen (siehe Abbildung 14). Nicht klar wird aus der Beschriftung, ab welchem Prozentwert der Punkt gelb oder rot dargestellt wird. Es kann angenommen werden, dass die weltweiten Kohleproduzenten nicht alle entweder genau 1% oder genau 10% der Kohlemenge Chinas produzieren.

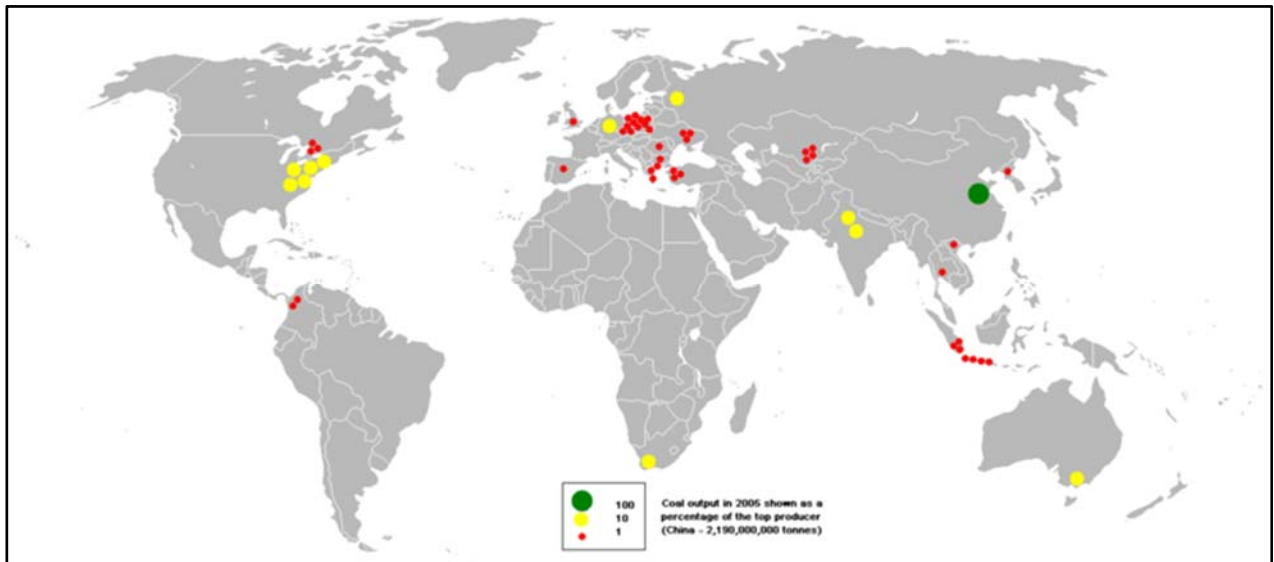


Abbildung 14: Weltkarte mit Kohleproduktion (Saadat, 2007)



Die Weltkarte in Abbildung 15 zeigt die globale Versorgung mit Trinkwasser auf. Dabei werden die Länder mit einer Farbe zwischen Dunkelrot und Dunkelblau eingefärbt, je nachdem wie kritisch die Versorgung der Bevölkerung mit erneuerbarem Wasser ist. Erneuerbares Wasser beinhaltet alles Wasser, das in menschlichen Zeiträumen wieder aufgefüllt wird. Grundwasser gehört hingegen nicht dazu (UN, 2015b).

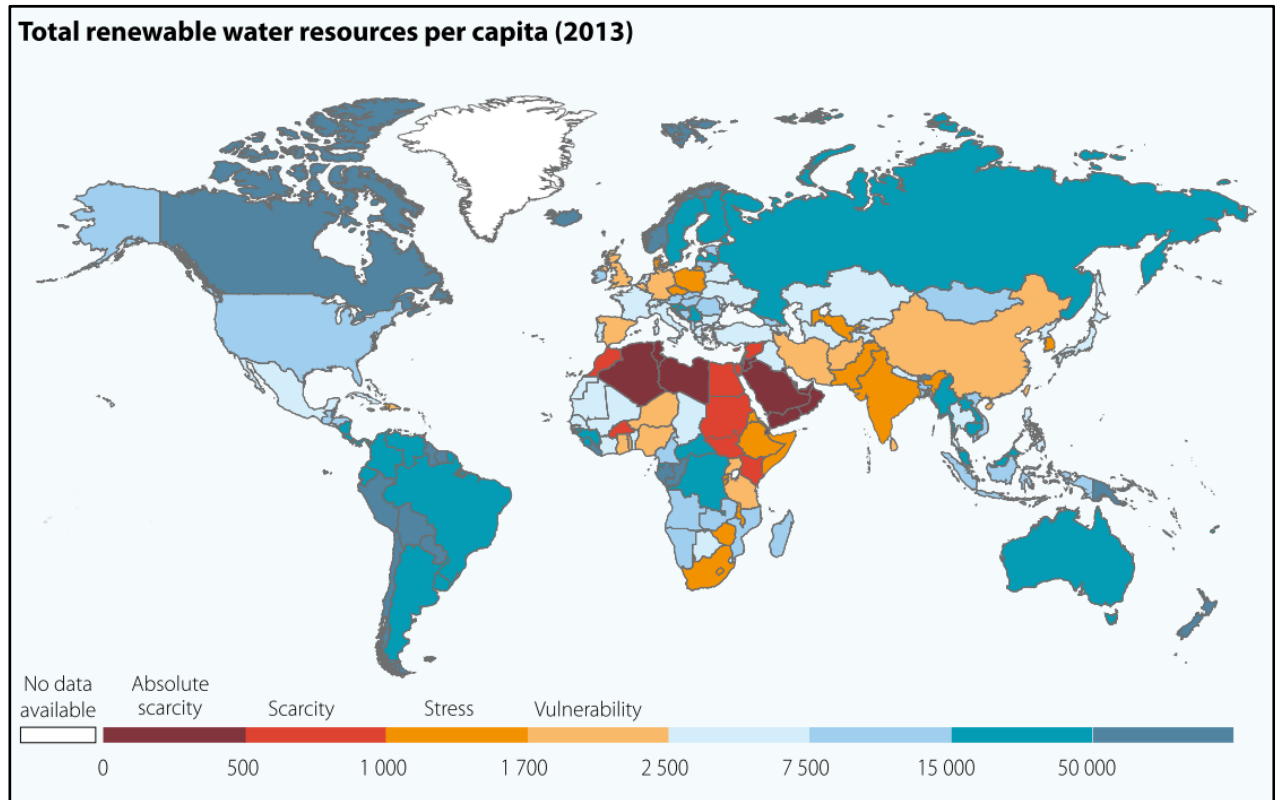


Abbildung 15: Weltkarte mit den erneuerbaren Wasserressourcen pro Kopf (UN, 2015b)

## Karten zum Thema NPK-Dünger

Die BGR hat im Jahr 2014 eine Publikation mit zwei Karten zum Thema P veröffentlicht (BGR, 2014). Die erste Karte (siehe Abbildung 16) zeigt einerseits die P-Reserven als schwarze Kreise und die Förderung im Jahr 2008 sowie im Jahr 2013 pro Land je als blauen und roten Balken. Andererseits werden die produzierenden Länder je nach Länderrisiko im Jahr 2012 mit einer Farbe zwischen grün und rot eingefärbt. Das Länderrisiko wird von der Weltbank jährlich anhand verschiedener Faktoren berechnet und teilt Länder in ein Ranking zwischen +2,5 für die theoretisch beste Regierungsführung und -2,5 für die theoretisch schlechteste Regierungsführung ein.

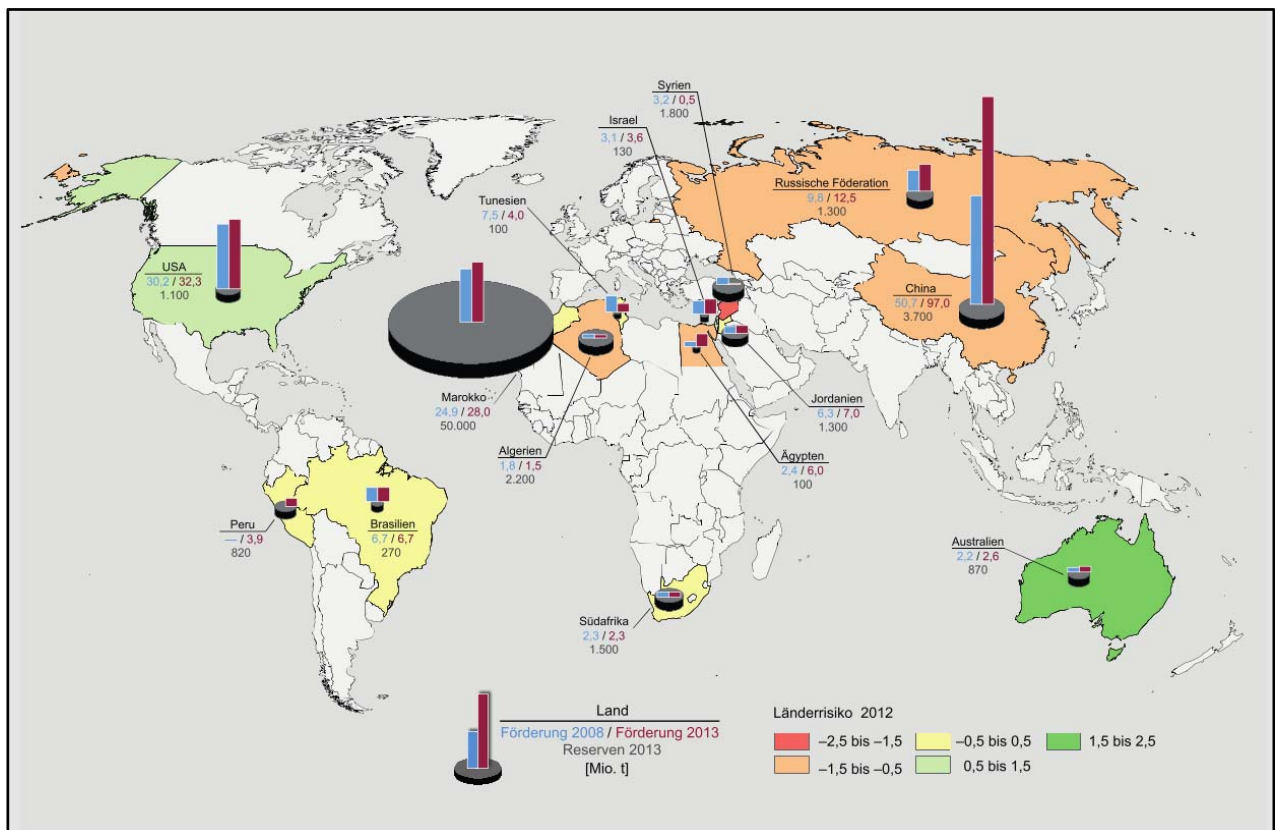


Abbildung 16: Karte zum Thema Phosphor-Düngerherstellung und Reserven und zum Länderrisiko (BGR, 2014)

Abbildung 17 zeigt die zweite Karte aus dem BGR-Artikel, die neben dem Länderrisiko die grössten existierenden Bergwerke, sowie Explorations- und Bergbauprojekte als Symbole anzeigt. Die Symbole sind nicht geolokalisiert, sondern zeigen an, ob im entsprechenden Land mindestens eines der erwähnten Projekte existiert oder nicht.

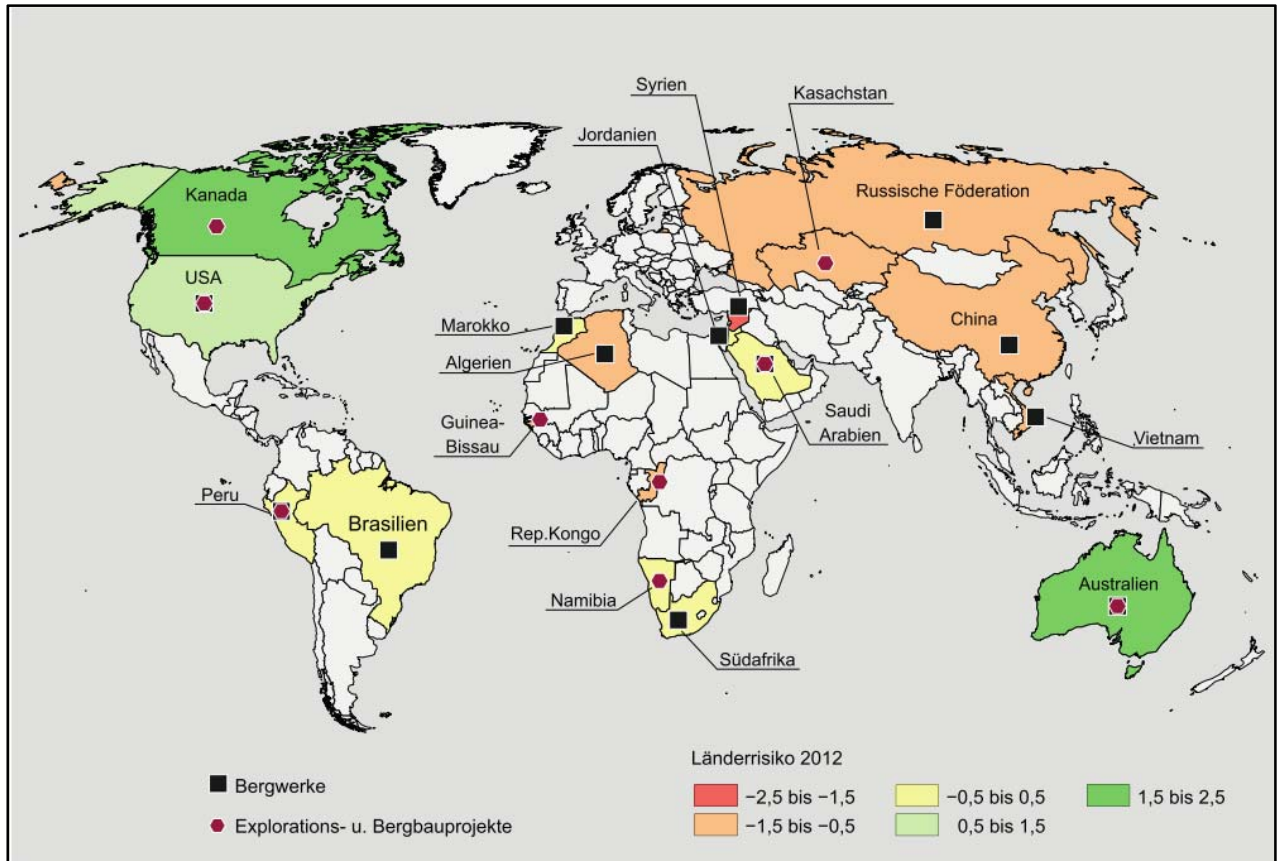


Abbildung 17: Karte mit den Ländern mit den grössten Phosphor-Bergwerken, Explorations- und Bergbauprojekten (BGR, 2014)

In der Karte von Schröder et al. (2010) sind die fünf Länder, die am meisten P-Reserven ihr Eigen nennen, rot markiert. Weiter sind die acht grössten Phosphorsäure produzierenden Länder schraffiert (siehe Abbildung 18).

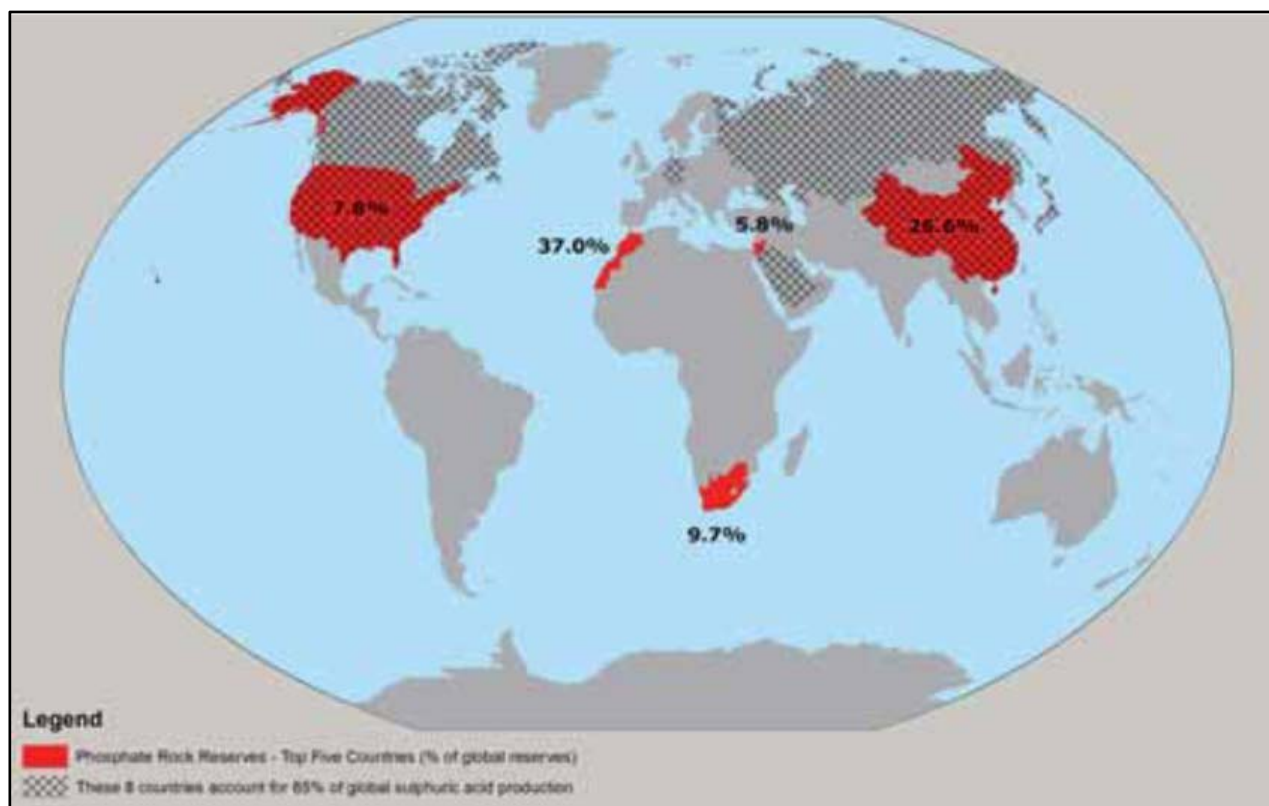


Abbildung 18: Welt-Karte mit den Ländern mit den grössten Phosphat-Reserven und der grössten Schwefelsäure-Produktion (Schröder et al., 2010)

Im Gegensatz zu den anderen beschriebenen Karten werden in der Karte von Fixen und Johnston (2012) in Abbildung 19 verschiedene P-Vorkommen genau lokalisiert angegeben. Je nachdem, ob es sich um vulkanische, sedimentäre oder auf Inseln liegende Reserven oder potentielle Reserven handelt, werden sie durch ein blaues, grünes oder rotes Symbol dargestellt.

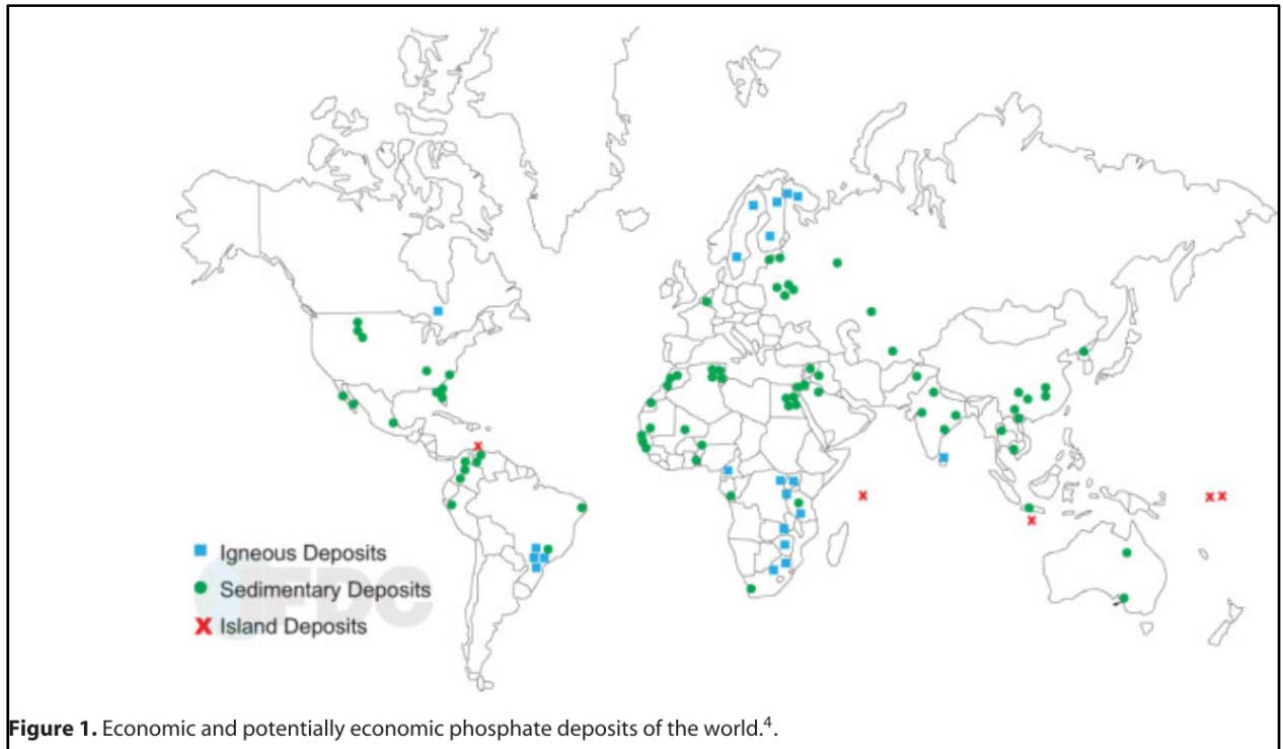


Abbildung 19: Welt-Karte mit ökonomisch und potentiell ökonomisch ausbeutbaren Phosphat-Vorkommen (Fixen & Johnston, 2012)

Die Karte von MacDonald et al. (2011) zeigt geolokalisierte Daten zu den weltweiten P-Defiziten in Blau und -Überschüssen in Rot (siehe Abbildung 20).

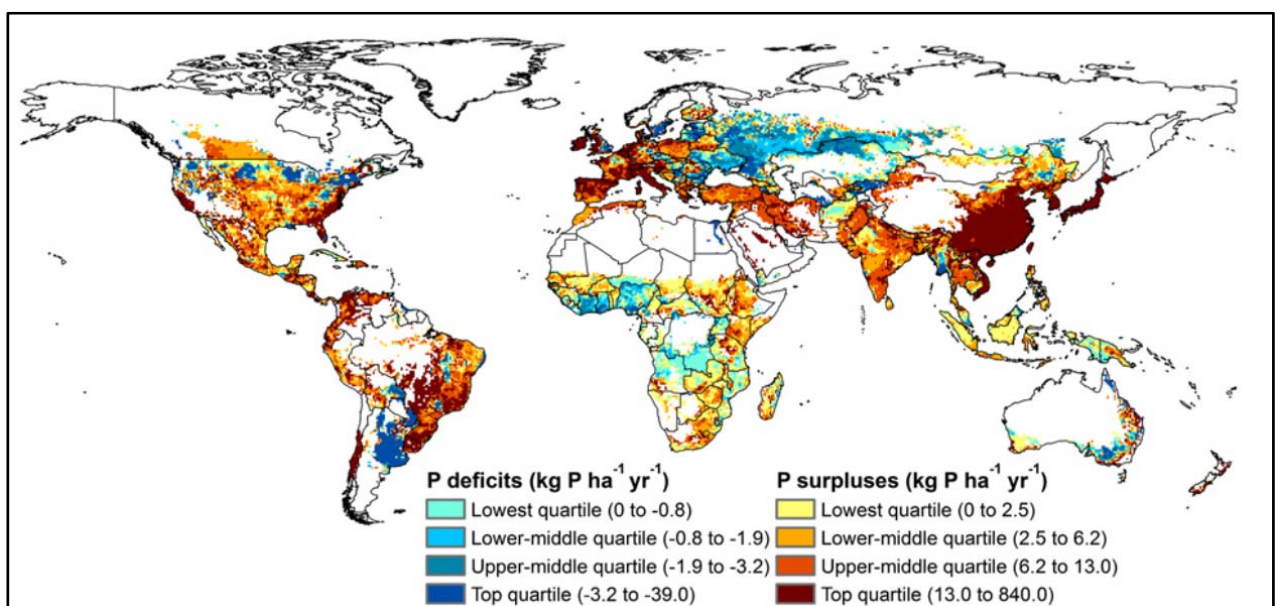


Abbildung 20: Karte zum Thema Überschuss und Defizit von Phosphor (MacDonald et al., 2011)



Die Karte von Bartz et al. (2015) in Abbildung 21 unterscheidet sich zu den bisherigen hauptsächlich darin, dass neben geolokalisierten Unternehmen der Düngemittelindustrie zu jedem Symbol auf der Karte ein erklärender Text besteht. Die Farbe der Fabrik-Nummern ist je nach Umsatz des Unternehmens anders eingefärbt.

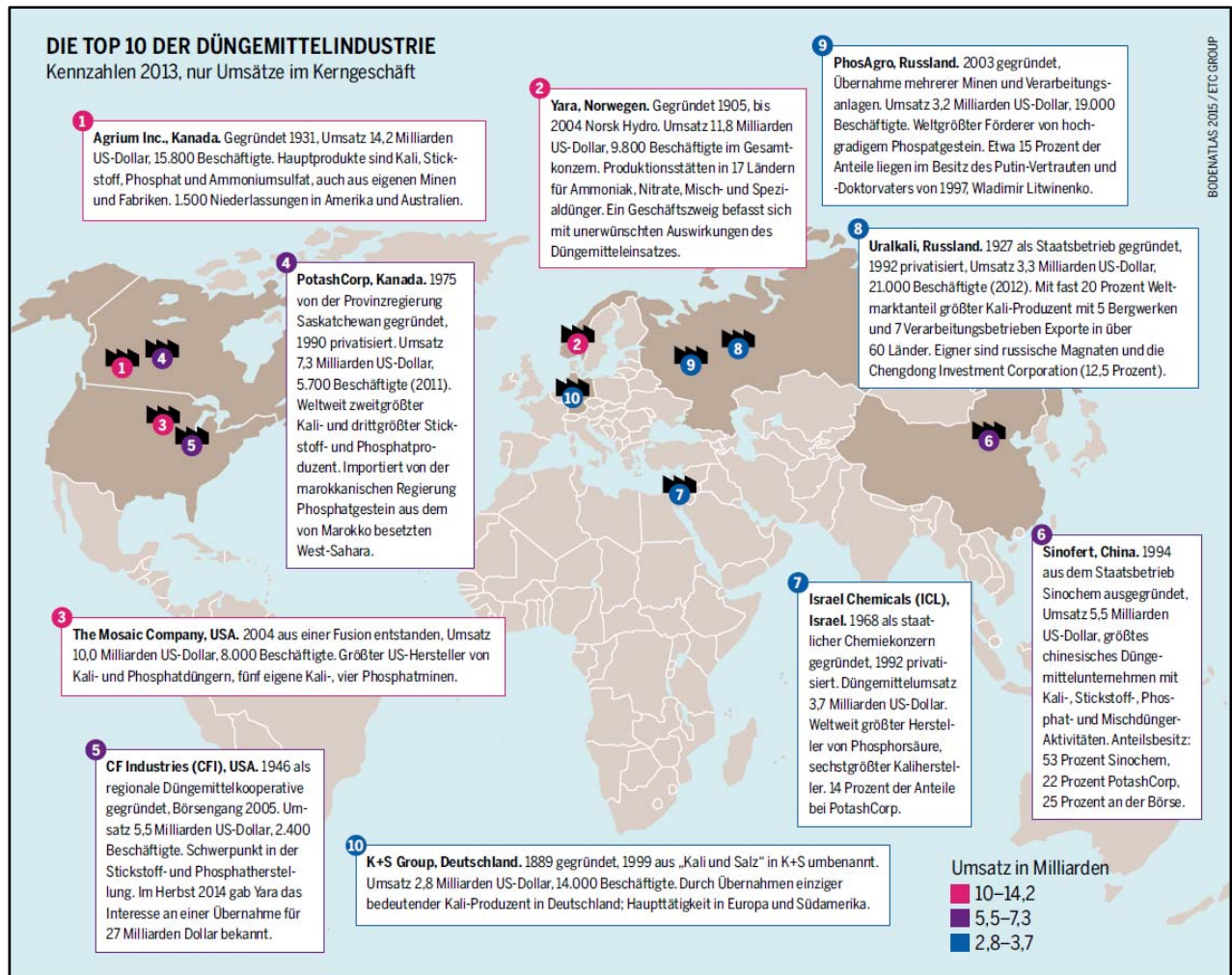


Abbildung 21: Welt-Karte zum Thema der grössten Düngemittel-Hersteller (Bartz et al., 2015)

## Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel zusammengestellten Karten werden in Tabelle 21 verglichen. Ausserdem werden darin Vor- und Nachteile der gewählten Darstellung aufgelistet. Die Zusammenstellung zeigt die Schwierigkeit der verständlichen Darstellung von Ressourcen-Daten auf einer Karte. Sie dient als Grundlage für die in dieser Arbeit erstellten Karten.

**Tabelle 21: Zusammenstellung der untersuchten Karten, Beschreibung der gewählten Darstellungsform und Kritik**

Quelle	Ressource	Darstellung	Kritik
Bentley (2002)	Erdöl	Kuchendiagramme (Reserven und schon verbrauchter Teil)	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Die Verteilung der Reserven ist durch die variierende grössse der Kuchen gut ersichtlich</li> <li>+ Klare Botschaft, dass die gut verfügbaren Reserven schon zur Hälfte verbraucht sind</li> <li>- Die Darstellung suggeriert durch die Kuchen ein absolutes Ende der Reserven, obwohl die Reserven von den ökonomischen Verhältnissen abhängig ist</li> </ul>
Goldfard et al. (2005)	Gold	Der Hauptgesteinstyp wird als Farbe, die Gold-Vorkommen als schwarze oder rote (wenn die Information umstritten ist) Punkte dargestellt. Die Form der Punkte gibt an wie alt das Vorkommen ist	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Viel Information in einer Karte</li> <li>- Die Farbe des Gesteins kann unter den Punkten nicht erkannt werden</li> </ul>
Möckli (2008)	Erdgas, Erdöl, Uran, Diamanten, einige Metalle	Für Erdgas und Erdöl: Anzeige als Balken, die wahrscheinlich die Reserven angeben Für Uran, Diamanten und Metalle: Symbole markieren das Vorkommen in verschiedenen Ländern	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Verteilung der dargestellten Ressourcen gut ersichtlich</li> <li>+ Übersichtliche Darstellung</li> <li>- Unklar ob sich die Erdgas- und Erdöl-Balken auf die Reserven beziehen oder nicht</li> <li>- Keine Skala für die Erdöl- und Erdöl-Balken angegeben</li> </ul>
Saadat (2007)	Kohle	Kohleproduzenten werden im Vergleich zu China (grüner Punkt) als roter (1%) oder gelber (10% der chinesischen Produktion) Punkt dargestellt	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Wenig, dafür schnell erkennbare Information</li> <li>- Unklar wie Länder mit Prozentzahlen zwischen 1 und 10 sowie 10 und 100 klassifiziert werden</li> </ul>
United Nations (2015)	Wasser	Einfärbung der Länder zwischen Dunkelrot und Dunkelblau je nachdem wie kritisch die Versorgung mit erneuerbarem Wasser ist	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Gut sichtbar in welchen Ländern die Wasserversorgung prekär ist</li> <li>- Keine Einheit in der Legende angegeben</li> </ul>
BGR (2014) / Abbildung 16	Phosphor	Einfärbung der Länder nach Länderrisiko, Anzeige der Phosphor-Reserven als schwarze Kreise, die Phosphor-Förderung aus den Jahren 2008 und 2013 wird mit Balken angezeigt	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Unterschiede zwischen den Reserven verschiedener Länder gut ersichtlich</li> <li>+ Erhöhung der Produktion in China gut sichtbar</li> <li>+ Verbindung von hohem Länderrisiko und vielen Reserven erkennbar</li> <li>- Reserven-Symbole bei Ländern mit wenig Reserven nur sehr schlecht sichtbar</li> </ul>
BGR (2014) / Abbildung 17	Phosphor	Einfärbung der Länder nach Länderrisiko, Darstellung der grössten existierenden Bergwerke, Bergbau- und Explorations-Projekten als Symbole	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Kombination von Kreis und Quadrat ist nicht einfach erkennbar (siehe USA)</li> <li>- Nur anhand der Existenz von Bergwerken und Explorationsprojekten kann nichts über die Produktionsleistung und die Reserven ausgesagt werden. Es ist darum fraglich, ob das Länderrisiko auch dargestellt werden soll</li> </ul>
Schröder et al. (2010)	Phosphor	Die fünf Länder mit den grössten Phosphor-Reserven sind rot eingefärbt, die acht grössten Phosphordünger-Produzenten schraffiert	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Klar ersichtlich, wo die grössten Phosphor-Reserven liegen</li> <li>- Keine Ländernamen angegeben</li> <li>- Teilweise schwierig erkennbar ob über dem Rot eine Schraffur liegt</li> </ul>
Fixen und Jonston (2012)	Phosphor	Geolokalisierte Symbole, die verschiedene Phosphor-Vorkommen anzeigen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dadurch, dass die Grösse der Reserven nicht angegeben wird ist die Aussagekraft der Karte sehr beschränkt</li> </ul>
MacDonald et al. (2011)	Phosphor	Geolokalisierte Pixel-Daten, die Phosphor-Defizite und -Überschüsse farblich anzeigen	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Trotz kleiner Datenpunkte gut sichtbar, wo sich Regionen mit grossen Überschüssen oder Mängeln befinden</li> <li>- Keine Ländernamen angegeben</li> </ul>
Bartz et al. (2015)	Düngemittel	Geolokalisierte Symbole zu den grössten Düngemittel-Firmen. Die Symbole und Text-Boxen sind auf Grund des Umsatzes der Firma verschieden eingefärbt	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Viel Information in einer Karte</li> <li>+ Klare Aussage zur Konzentration der grössten Düngemittelhersteller auf wenige Länder</li> </ul>

## 4.6 Karten

Die in diesem Kapitel dargestellten Karten ergeben sich aus der Fragestellung, wie die gewonnenen Erkenntnisse kartographisch dargestellt werden können.

Aus der vorliegenden Arbeit kommen folgende Daten für eine kartographische Darstellung in Frage:

- Reserven-Angaben zu P- und K-Vorkommen aus den Jahren 2000 bis 2014
- Abbauraten der P- und K-Minen aus den Jahren 2000 bis 2013
- Reichweite-Schätzungen mit der R/C-Methode für die globalen Reserven sowie für die Reserven-Reichweite in einzelnen Ländern (Cooper et al., 2011)
- Geolokalisierte Umweltbelastungen bei der Herstellung von Kalium- und Phosphordüngern

Nach der Anfertigung einiger Karten-Entwürfe wurden aus den daraus gewonnen Erkenntnissen die definitiven Karten erstellt. Dieser Prozess wird in den nächsten Abschnitten beschrieben.



## Karten-Entwürfe

Auf dem ersten Entwurf in Abbildung 22 wurden die P- und K-Reserven aus dem Jahr 2014 als Balken mit derselben Skala dargestellt. Gut erkennbar ist, dass Marokko die grössten Reserven besitzt und die globalen K-Reserven massiv kleiner sind als die von P. Die gewählte Grösse der Balken lässt sie allerdings in verschiedenen Ländern praktisch verschwinden. Besonders ungünstig ist hier die Darstellung von K- und P-Reserven in der gleichen Skala, da die K-Reserven so praktisch nicht abgeschätzt werden können.

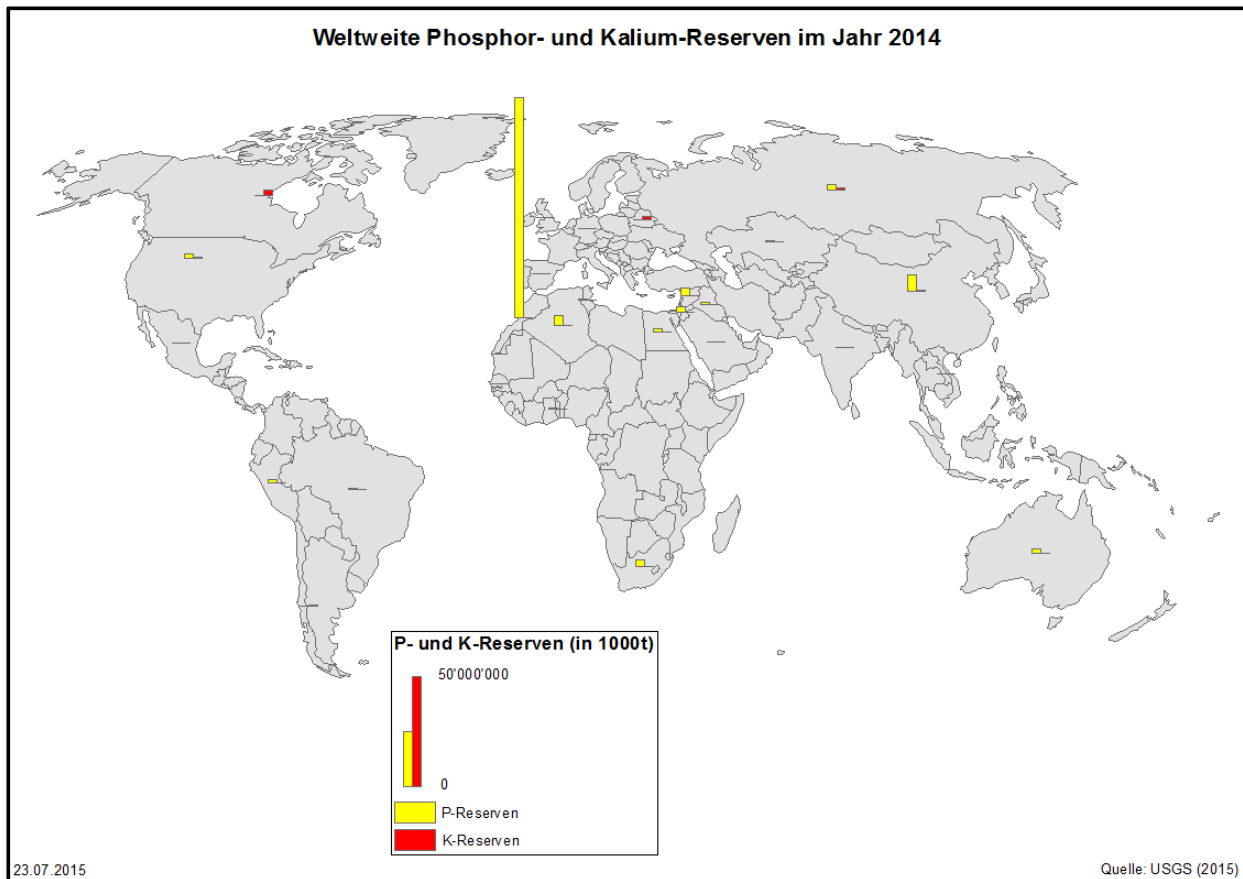


Abbildung 22: Weltkarte mit den Phosphor- und Kalium-Reserven im Jahr 2014

In Abbildung 23 sind die P- und K-Reserven aus dem Jahr 2014 als braune und türkisfarbene Haufen dargestellt. Die Haufen wurden für P und K in je unterschiedliche Klassen aufgeteilt. Hier sind die Unterschiede innerhalb der Ressourcen gut sichtbar, allerdings scheinen die K-Reserven auf den ersten Blick nicht kleiner als die P-Reserven, da unterschiedliche Skalen verwendet wurden. Auch ist nicht ausreichend ersichtlich, dass Marokko über das zehnfache der Reserven von China verfügt.

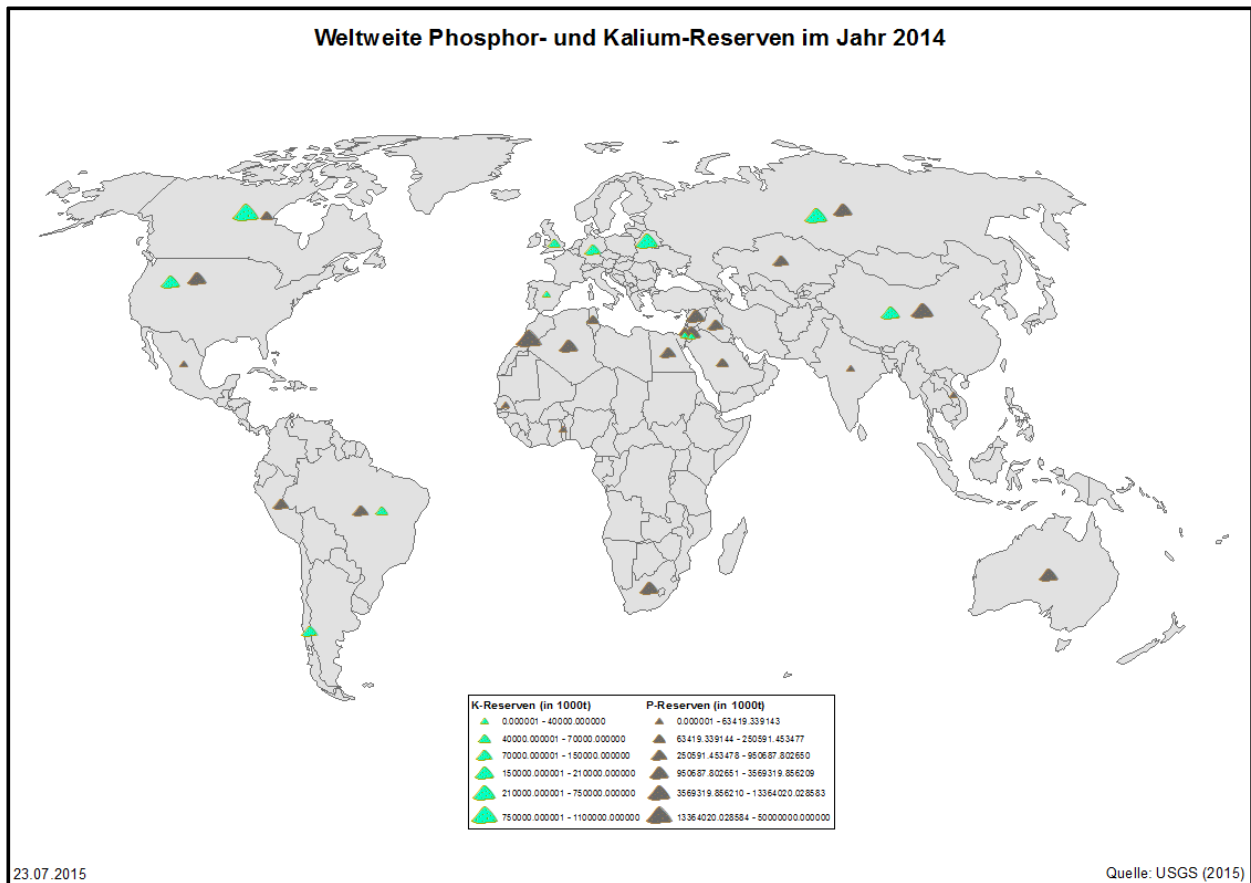


Abbildung 23: Karte mit den weltweiten Phosphor- und Kalium-Reserven im Jahr 2014

Die gleichzeitige Darstellung von P- und K-Reserven auf den bisher erstellten Karten verhinderte die Abbildung der jährlichen Produktionsraten beider Ressourcen. Ohne Angaben der Produktion ist das Abschätzen der Reserven-Reichweite auf einer Karte aber nur schwer möglich. Die folgenden Karten konzentrieren sich daher lediglich auf einen Rohstoff.

Auf der Karte in Abbildung 24 sind die P-Reserven als Farbe zwischen Grün, Gelb und Rot und die Produktion als blauer Balken dargestellt. Die Reserven sind in logarithmische Klassen eingeteilt und farblich codiert. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Karten ist hier ersichtlich, dass die USA und China grosse Abbauraten haben.

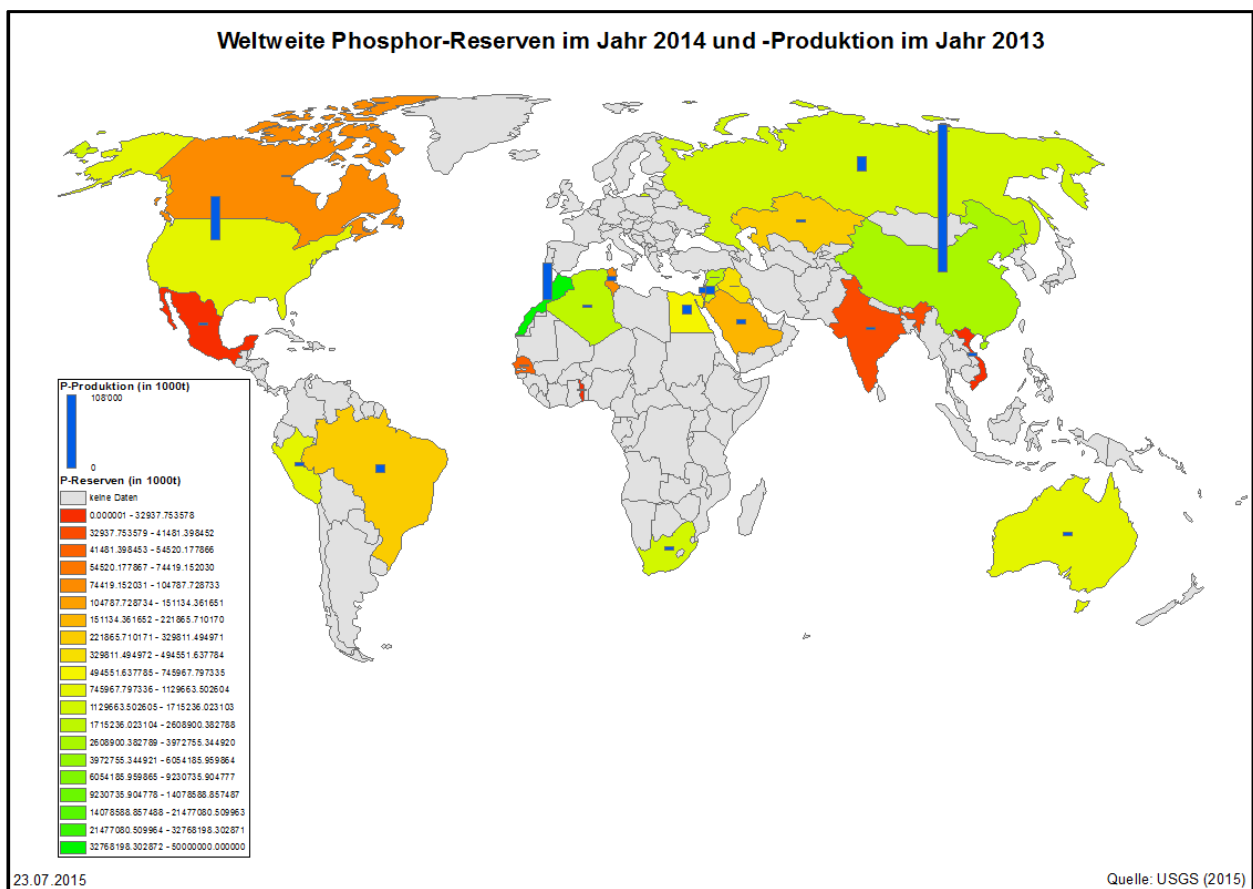


Abbildung 24: Weltweite Phosphor-Reserven im Jahr 2014 und -Produktion im Jahr 2013

Um die Reichweite der Reserven darzustellen, sind auf der Karte in Abbildung 25 die Reserven aus dem Jahr 2014 (gesamter Balken) und die 100 Jahre später noch vorhandenen (roter Teil) dargestellt. Die in 100 Jahren noch verbleibenden Reserven wurden anhand der R/C-Methode mit den statischen Produktionsdaten aus dem Jahr 2013 berechnet. Dies ist die erste Karte, auf der deutlich wird, dass in 100 Jahren die Länder China und USA ihre Reserven komplett aufgebraucht haben werden.

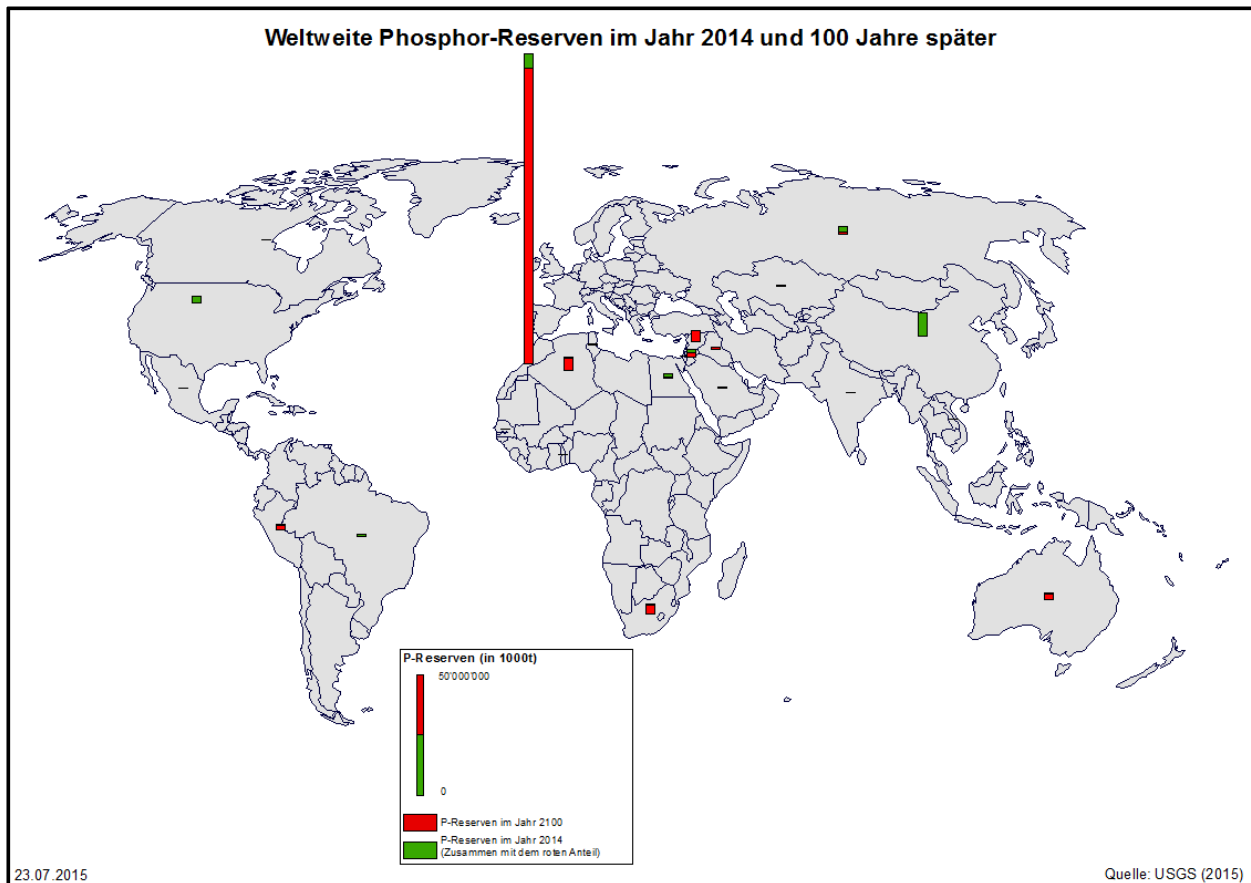


Abbildung 25: Weltkarte der Phosphor-Reserven im Jahr 2014 sowie 100 Jahre später

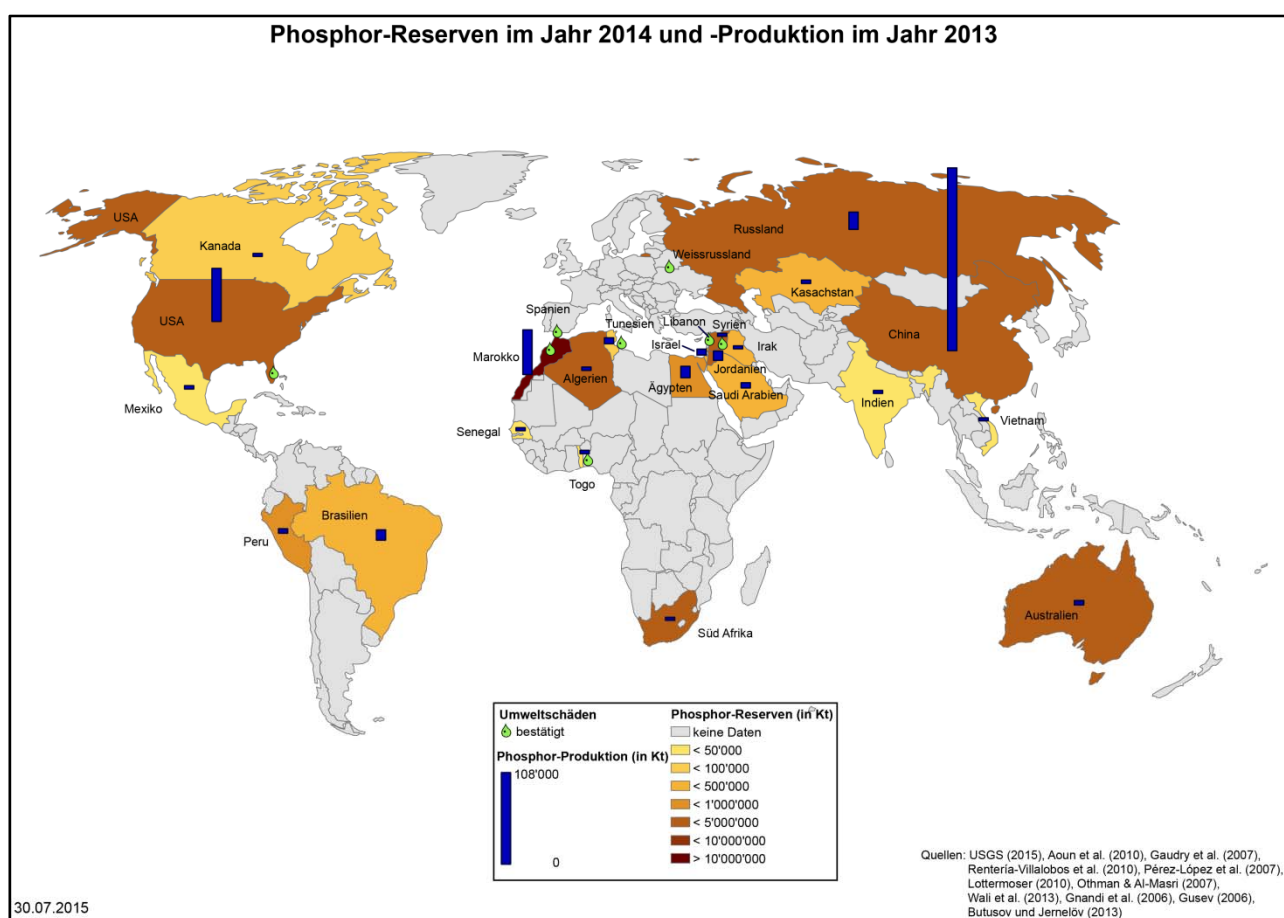
Durch die erstellten Karten wurde klar, welche grundsätzlichen Aussagen mit den Karten gemacht werden sollen. Diese sind hier aufgelistet:

- Es soll ersichtlich sein, dass Marokko heute mit Abstand die meisten P-Reserven besitzt
- China und die USA bauen heute sehr viel P ab, werden aber ihre Reserven bald erschöpft haben
- In einigen Jahrzehnten wird die Welt, was die Phosphorversorgung betrifft, von nur noch sehr wenigen Ländern abhängig sein
- Die Situation beim K ist dramatischer als beim P. Es soll aufgezeigt werden, wie die einfach verfügbaren Reserven abnehmen und wie dabei die Abhängigkeit von wenigen Ländern steigt

## Definitive Karten

Auf Grund der im vorherigen Abschnitt definierten Aussagen, die die erstellten Karten vermitteln sollen, wurden zwei Haupt-Karten sowie zwei Karten des Typs „small multiples“ zu den Themen P und K erstellt. Die Karten in diesem Abschnitt befinden sich in grösserer Auflösung in Anhang 3.

Auf der in Abbildung 26 dargestellten Karte sind die P-Reserven aus dem Jahr 2014 in sieben Farb-Klassen, die P-Produktion aus dem Jahr 2013 in blauen Balken und die bestätigten Umweltbelastungen als Symbol eines grünen Tropfens dargestellt. Die Karte zeigt, wie schon heute die grössten Reserven vor allem auf Marokko und China konzentriert sind. Sie zeigt auch, dass China und die USA eine viel höhere Abbaurate aufweisen als Marokko. Weiter wird sichtbar, dass die Düngemittelproduktion Umweltschäden in diversen Ländern verursacht.



**Abbildung 26: Weltkarte mit Phosphor-Reserven aus dem Jahr 2014 und -Produktion im Jahr 2013 und bestätigten Umweltbelastungen beim Abbau**

Die vier Karten in Abbildung 27 zeigen den geschätzten Stand der Reserven in den Jahren 2034, 2054, 2074 und 2094 in den selben Farben und Klassen wie die Hauptkarte. Die Reserve-Veränderungen auf den dargestellten Karten überraschen nicht. Gemäss dem verwendeten Rechnungsmodell besitzen China und die USA, die heute zu den grössten Produzenten zählen, bereits vor dem Jahr 2054 keine Reserven mehr. Die Karten zeigen, dass die verbleibenden Reserven auf

nur wenige Länder konzentriert sein werden. Dabei wird ersichtlich, dass Marokko den grössten Teil der Reserven besitzt und besitzen wird.

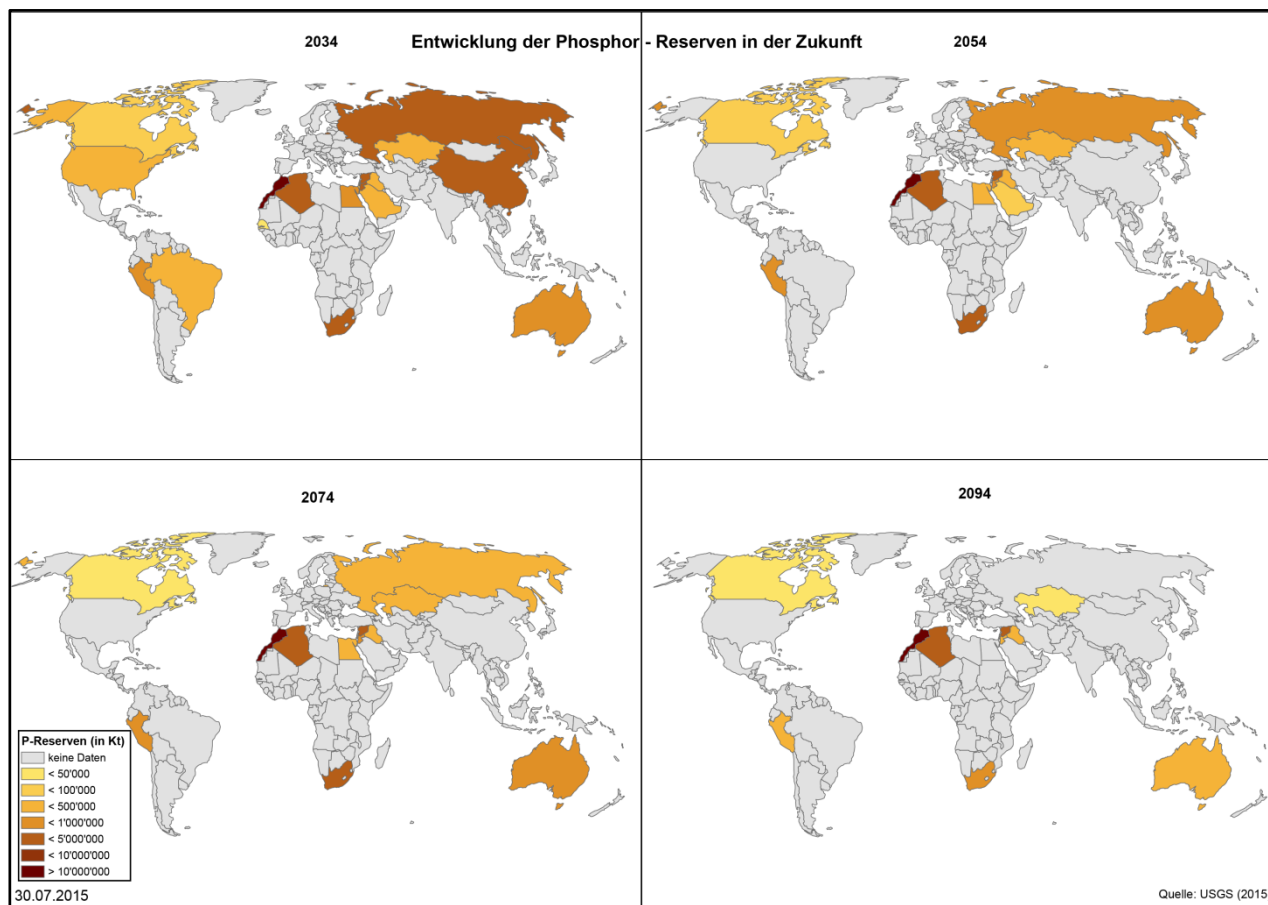
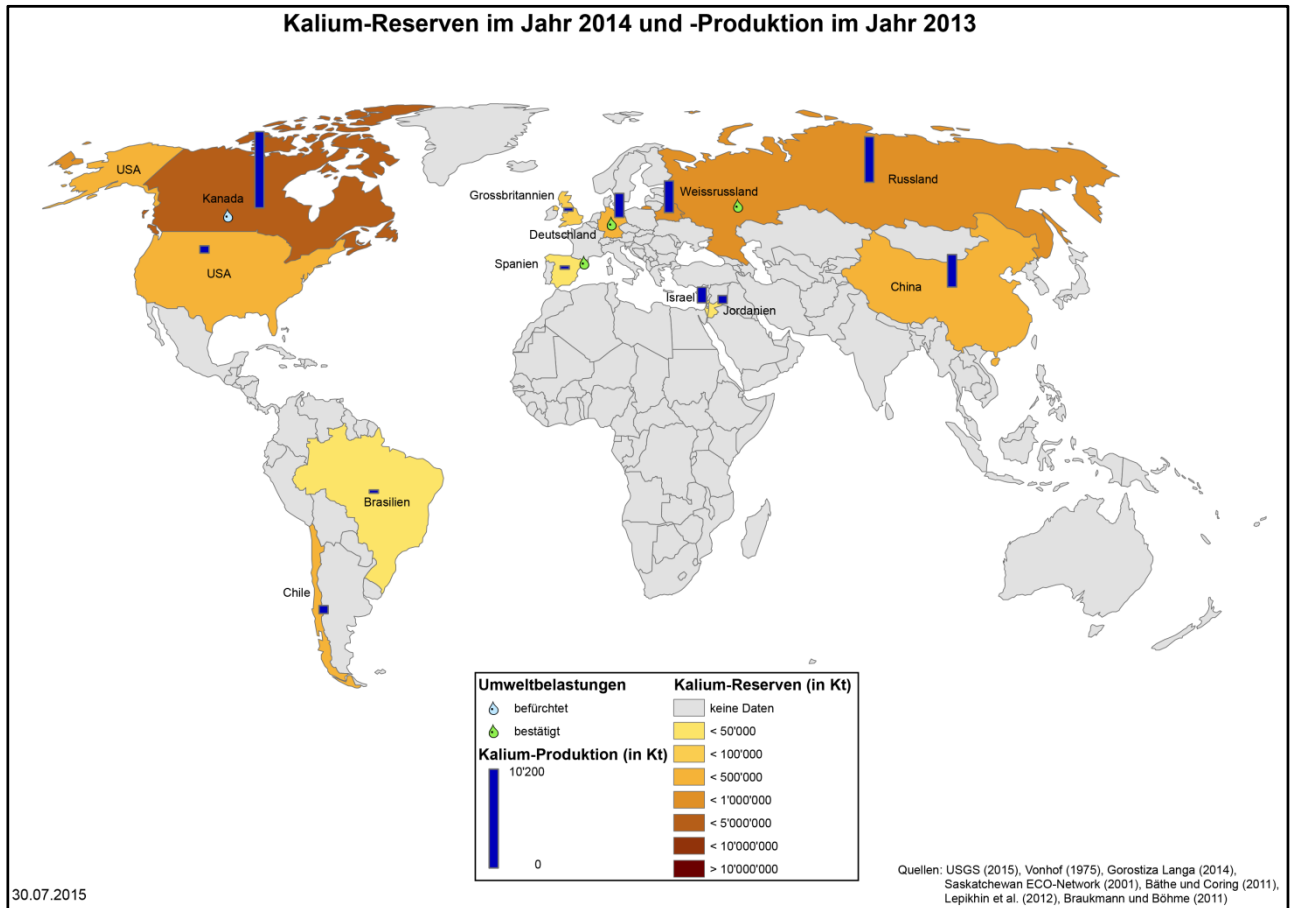


Abbildung 27: Vier Karten mit der Entwicklung der weltweiten Phosphor-Reserven in den nächsten 80 Jahren

Abbildung 28 zeigt eine Weltkarte, auf der die K-Reserven aus dem Jahr 2014 in sieben Farb-Klassen und die K-Produktion aus dem Jahr 2013 in blauen Balken dargestellt sind. Zusätzlich werden die bestätigten Umweltbelastungen als Symbol eines grünen, die unbestätigten als Symbol eines hellblauen Tropfens dargestellt. Gut erkennbar ist, dass heute die grössten K-Produzenten Kanada, Russland, China, Deutschland und Weissrussland sind.



**Abbildung 28: Weltkarte mit Kalium-Reserven aus dem Jahr 2014 und -Produktion im Jahr 2013 und bestätigten Umweltbelastungen beim Abbau**

Die Karten in Abbildung 29 zeigen die geschätzte Entwicklung der weltweiten K-Reserven in den nächsten 80 Jahren. Die Karten zeigen, dass die heute schon massiv schlechtere Reserven-Lage als bei P sich in Zukunft auch schneller verschärft. Die verbleibenden Reserven werden sich gemäss diesen Karten in Zukunft vor allem in den Ländern Kanada und USA befinden. Die heute als Reserven deklarierten K-Vorkommen werden gemäss dem verwendeten mathematischen Modell schon vor dem Jahr 2094 komplett aufgebraucht sein.

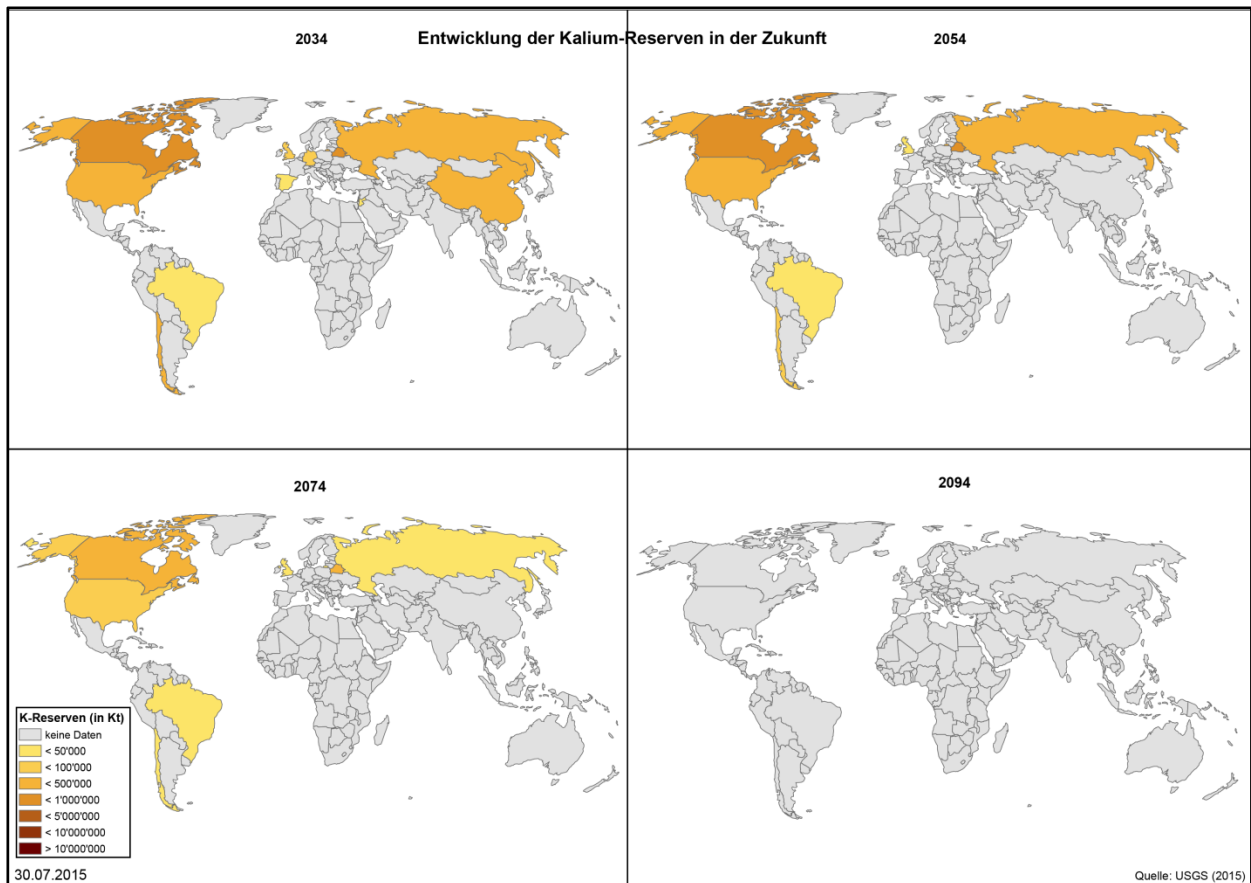


Abbildung 29: Vier Karten mit der Entwicklung der weltweiten Kalium-Reserven in den nächsten 80 Jahren



## 5 Diskussion

Nachfolgend werden die Risiken und Auswirkungen der NPK-Dünger-Elemente besprochen. Anschliessend werden die Auswirkungen der genannten Düngemittel beim Ausbringen und ihre Rolle in Bezug auf globale Verhältnisse diskutiert. Nach der Diskussion über die erstellten Karten folgen die Schlussfolgerungen und der Ausblick.

### 5.1 Stickstoff-Diskussion

Das grösste Risiko bei der Produktion von Stickstoffdüngern besteht darin, dass der Prozess sehr energieintensiv ist. Mit der zukünftigen Verknappung fossiler Energieträger muss zwingend eine Alternative für Erdgas als Energie- und Wasserstofflieferant gefunden werden.

Die Grundrohstoffe für die Herstellung von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) für Stickstoffdünger können nicht als endliche Ressourcen gelten. N kommt zu 78% in der Atmosphäre vor (Kraus, 2004), H kann neben Erdgas, Schweröl und Kohle auch aus Biogas gewonnen werden (Ahlgren et al., 2010; Motavalli, 2014). Aus diesem Grund ist die Reichweite der fossilen Brennstoffe zentral.

Gemäss aktuellen Schätzungen werden alle fossilen Brennstoffe in den nächsten 50 bis 100 Jahren oder früher ihren Peak erreicht haben (Mohr et al., 2015; Owen et al., 2010; Shafiee & Topal, 2008). Die Verknappung dieser Ressourcen wird sehr wahrscheinlich mit einer Erhöhung ihrer Preise einhergehen (Lutz et al., 2012). Wenn das Haber-Bosch-Verfahren ohne massive Preissteigerung weiter angewendet werden soll, muss in Zukunft zwingend eine alternative Wasserstoff-Quelle eingesetzt werden. Zur Zeit kommt nur Biogas als Alternative in Frage (Ahlgren et al., 2010; Motavalli, 2014). Gemäss Ahlgren et al. (2010) benötigt die Herstellung eines Kilogramms Stickstoffdüngers aus Gras 3.7 MJ, aus Mais 2.3 MJ fossile Energie. Dies ist im Verhältnis zu 35 MJ/kg N bei der Herstellung mit Erdgas zwar massiv weniger, allerdings würde somit fruchtbares Ackerland verloren gehen. Die AutorInnen berechnen, dass 4% der Grasfläche oder 2% der fruchtbaren Ackerfläche Schwedens eingesetzt werden müssten, um den gesamten Bedarf an Stickstoffdünger des Landes zu decken. Es scheint darum fraglich, ob im Zusammenhang mit dem zunehmenden Druck auf die globalen Landwirtschaftsflächen (IAASTD, 2009; Montgomery, 2007; Pimentel, 2006) eine grosse Fläche für die Herstellung von Biogas für Stickstoffdünger eingesetzt werden soll.

Neben mineralischem Dünger werden heute in der Landwirtschaft verschiedene andere Verfahren angewendet, um N in den Boden zu bringen. Dazu gehört, neben der Recyklierung organischer Materie durch das Liegenlassen von Ernterückständen oder das Ausbringen von Mist respektive Gülle, die biologische Stickstofffixierung (Galloway, 2013).

Leguminosen werden schon sehr lange als Stickstoffdünger eingesetzt (Galloway, 2013). Die Frage ist, ob sich damit die grosse Menge an durch das Haber-Bosch-Verfahren erstellten Stickstoffdünger ersetzen lässt. Während einige AutorInnen der Meinung sind, der globale Bedarf an Stickstoffdünger werde sich nicht mit Leguminosen decken lassen (Bardi et al., 2013; Crews & Peoples, 2004), sind andere der Meinung, dass durch deren Einsatz grosse Mengen an mineralischem Stickstoffdünger eingespart (Vance, 2001) oder ganz auf ihn verzichtet werden kann (Badgley et al., 2007).

Abgesehen von einer Studie über eine Ammoniak-Produktionsfabrik im Iran (Raouf et al., 2005) konnte in der Literatur kein Nachweis für direkte Umweltbelastungen bei der Herstellung von Ammoniak für Stickstoffdünger gefunden werden (Billen et al., 2013; Galloway, 2013; Raouf et al., 2005; Smil, 2001). Da gemäss Raouf et al. (2005) aber schwermetallhaltige Abfälle bei der Produktion entstehen, besteht die Möglichkeit, dass durch unsachgemässe Entsorgung in gewissen Ländern die Umwelt belastet wird. Hierzu gibt es in der untersuchten Literatur ebenfalls keine Nachweise.

## 5.2 Phosphor-Diskussion

Beim Phosphor liegen die zentralen Risiken in der Verteilung der verbleibenden Reserven und in den grossen Mengen an belasteten Abfällen.

Das Problem einer Reserven-Verknappung in naher Zukunft scheint mit den aktuellen Revisionen der globalen P-Reserven weniger dringend als früher (Cooper et al., 2011; Cordell et al., 2011; Kauwenbergh et al., 2013). Trotzdem sollten bereits schon Strategien für die Schliessung des P-Kreislaufes entwickelt werden. Dies ist vor allem darum wichtig, weil die Reserven trotz allem endlich und die Reserven-Schätzungen des USGS nicht über alle Zweifel erhaben sind. Ausserdem sind die verbleibenden Reserven auf sehr wenige Länder verteilt, was eine grosse Abhängigkeit von diesen mit sich bringt.

Obwohl sich die AutorInnen der untersuchten Studien in der Frage, ob die weltweite P-Versorgung in nächster Zeit gefährdet ist oder nicht, uneinig sind, räumen alle ein, dass die heutige Nutzung von Phosphordünger nicht nachhaltig ist (Cordell et al., 2011; Odegard & van der Voet, 2014; Scholz & Wellmer, 2013; Vaccari & Strigul, 2011; Walan et al., 2014). Einerseits liegt das Problem darin, dass P aus endlichen Quellen in Bergwerken gefördert und dann über die Ackerflächen direkt in Flüsse und Meere ausgewaschen wird, wo es auf dem Grund abgelagert wird. Andererseits gelangt es über die Nahrung in den menschlichen Urin und die Fäkalien, womit es oft auch im Wasser oder in Deponien landet (Scholz & Wellmer, 2013). Heute entspricht die Menge an gefördertem P ungefähr der Menge, die auf die Gewässer-Böden sickert (Scholz & Wellmer, 2013). Langfristig scheint es darum unausweichlich, dass P aus menschlichen und tierischen Exkremen-

ten rezykliert und durch die Förderung von Mykorrhizapilzen (Verzicht auf Bodenbearbeitung oder Methoden der Permakultur) das im Boden gespeicherte P besser verfügbar gemacht wird (Déry, 2013).

In der Diskussion um die Reichweite der verbleibenden P-Reserven ist das Jahr 2011 zentral. Wie in Abbildung 3 gut ersichtlich, wurden die weltweiten P-Reserven vom USGS im Jahr 2011 auf 65 Mt  $P_2O_5$  massiv nach oben korrigiert (Jasinski, 2010a, 2011a). Dadurch müssten sämtliche bis dahin existierende Reichweite-Schätzungen revidiert werden. Aus diesem Grund werden diese Studien hier nicht diskutiert. Studien, die sich auf USGS-Berichte aus dem Jahr 2011 oder später beziehen, kommen anhand der R/C-Methode auf Reichweiten von über 300 Jahre (Cooper et al., 2011; Kauwenbergh et al., 2013; Scholz & Wellmer, 2013). Ein möglicher „Phosphor-Peak“ wird gemäss Cordell et al. (2011) ungefähr im Jahr 2070, gemäss Mohr und Evans (2013) je nach Szenario zwischen 2011 und 2118 erreicht. Die Reichweiten-Schätzungen gehen teilweise weit auseinander. Ausserdem existiert in der Wissenschaft kein Konsens dafür, welche Methode für eine Voraussage adäquat ist (siehe Kapitel 4.2.2). Überzeugend scheint, dass die R/C-Methode und die Hubbert-Kurven-Schätzung nur grobe Annäherungen und frühe Warnindikatoren darstellen (Hendrix, 2011; Scholz & Wellmer, 2013; Vaccari et al., 2014; Vaccari & Strigul, 2011; Walan et al., 2014).

Eine wichtige Frage besteht darin, ob und mit welchem Aufwand die jetzt nicht als Reserven deklarierten Ressourcen abgebaut werden können. Vaccari et al. (2014) gehen davon aus, dass beispielsweise in Libyen grosse, wenig erforschte Reserven schlummern und in den USA, sobald der Preis steigt, noch über acht Gt P-Gestein zu den Reserven gezählt werden können. Gilbert (2009) geht davon aus, dass P-Gestein mit niedrigen P-Gehalten nicht gefördert werden kann, da dabei auch sehr viel Cadmium mitgefördert und so die Landwirtschaftsböden zu stark belastet würden. Schneller sinken als angenommen könnten die Reserven gemäss Cooper et al. (2011), wenn in den Förderländern die Umweltstandards erhöht oder die fossilen Energieträger teurer werden.

Der grösste Teil der in dieser Arbeit zitierten Literatur bezieht sich auf Daten des USGS. Diese Daten können aber keineswegs als gesichert angesehen werden (Odegard & van der Voet, 2014). Es liegt in der Sache der Natur, dass Unternehmen, die einen grossen Teil der Daten liefern, kein Interesse daran haben, globale Schätzungsdaten zu erheben oder diese der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen (Fixen & Johnston, 2012; Scholz & Wellmer, 2013). Durchaus verändert werden könnte aber, dass die veröffentlichten Daten des USGS von einer unabhängigen Stelle verifiziert werden (Gilbert, 2009).

Ein Vergleich der Daten des USGS mit denen des BGR zeigt, dass das BGR zumindest für das Jahr 2014 zu denselben Ergebnissen kommt wie das USGS (BGR, 2014; USGS, 2015a). Aller-

dings beziehen sich die beiden Institute auf Firmen, für welche die oben genannten kritischen Einwände gelten.

Die massive Erhöhung der Reserven Marokkos blieb in der Fachliteratur nicht ohne kritisches Echo bezüglich der Glaubwürdigkeit der USGS-Schätzung. Gemäss Edixhoven, Gupta und Savenije (2013) basiert die Information für den Reserven-Anstieg Marokkos im USGS-Reports des Jahres 2011 auf dem IFDC-Report von Kauwenbergh (2010) und auf Informationen marokkanischer Firmen. Sie überprüfen in ihrem Paper die Aussagen des IFDC-Berichts und kommen zum Schluss, dass dieser eher unglaublich ist. Ihr Paper ist allerdings noch nicht veröffentlicht und wird von Scholz und Wellmer (2015a) massiv kritisiert. Die Diskussion über die Veröffentlichung des Artikels von Edixhoven, Gupta und Savenije (2013) kam bis zum Abschluss dieser Arbeit nicht zu einem Ende. Sie kann im Internet (Scholz & Wellmer, 2015b) eingesehen werden.

Neben der Situation der gesamten P-Reserven wird in der untersuchten Literatur auch die Verteilung der Reserven diskutiert. Die Reserven sind stark auf einige Länder konzentriert und befinden sich im Besitz weniger Firmen (BGR, 2014; Cooper et al., 2011; Walan et al., 2014). Cooper et al. (2011) gehen davon aus, dass im Jahr 2100 88% der Reserven in Marokko liegen, da die meisten anderen Länder ihre Reserven bis dahin ausgeschöpft haben werden. Marokko müsste dann gemäss Cooper et al. (2011) über 80% der globalen Produktion bestreiten, womit es seine heutigen Produktionskapazitäten massiv steigern müsste. Dass damit alle Länder, die P importieren, stark von Marokko abhängig wären, ist offensichtlich.

Als Hauptproblem bezüglich direkter Umweltbelastungen bei der Herstellung von Phosphordünger können die grossen Mengen an anfallendem Phosphorgips betrachtet werden (Lottermoser, 2010). Dies ist insbesondere darum wichtig, weil die vermutlich auch in Zukunft ansteigenden Mengen an gefördertem P die Abfallberge noch massiver anwachsen lassen. Da die unsachgemässe Lagerung bereits schon in vielen Ländern massive Umweltbelastungen verursacht hat (siehe Kapitel 4.3.2) besteht hier dringender Handlungsbedarf. Besonders in Marokko muss die Situation möglichst bald verbessert werden, da dort gemäss den heutigen Reserve-Schätzungen in Zukunft ein sehr grosser Anstieg der Phosphordünger-Produktion zu erwarten ist (Cooper et al., 2011).

Gemäss Tayibi et al. (2009) wurde schon viel erreicht, um die Abfälle besser zu lagern oder weiter zu verarbeiten, allerdings bleibt noch viel zu tun. Die Frage, was mit den grossen Phosphorgips-Abfallbergen geschieht, wenn eine Mine stillgelegt wird, ist oft auch ungeklärt (Butusov & Jernelöv, 2013).

### 5.3 Kalium-Diskussion

Die Reserven-Situation von K hat sich im Gegensatz zu P in den letzten Jahren nicht entschärft, sondern wurde zunehmend prekärer (Jasinski, 2014b, 2015b). Dazu bestehen Bedenken zu po-

tentiellen Umweltbelastungen, die bisher aber erst an wenigen Orten eingetreten sind, oder zumindest nicht dokumentiert wurden.

Die Schätzung der globalen K-Reserven gemäss USGS wurde in den letzten drei Jahren von 9.5 Millionen Kilotonnen im Jahr 2013 um fast zwei Drittel auf nur noch 3.5 Millionen Kilotonnen im Jahr 2015 korrigiert (Jasinski, 2013b, 2015b). Studien, die sich auf Daten aus dem Jahr 2013 oder früher beziehen (Al Rawashdeh & Maxwell, 2014; Ciceri et al., 2015; Fixen & Johnston, 2012; Odegard & van der Voet, 2014; Roberts, 2008; Sutton et al., 2013), müssten daher vollständig überarbeitet werden. Zum Erscheinungsdatum dieser Arbeit konnte erst ein Artikel gefunden werden, der sich auf die USGS-Daten aus dem Jahr 2014 bezieht (Manning, 2015). Verständlicherweise wird in allen Artikeln, die sich auf Daten vor dem Jahr 2014 beziehen, erwähnt, dass die Versorgung mit K in naher Zukunft kein Problem darstellt. Eine Ausnahme sind Odegard und van der Voet (2014), die in ihren Berechnungen gemäss den vier IPCC-Szenarien unabhängig vom Verlauf auf unter 60 Jahren Reichweite kommen. Würden ihre Berechnungen mit den Zahlen aus dem Jahr 2015 anstatt 2011 durchgeführt, würden ihre Szenarien nochmals massiv negativer ausfallen. Manning (2015) kommt auf 175 Jahre Reichweite gemäss R/C-Verhältnis, was im Vergleich zu Schätzungen vorangegangener USGS-Berichte bereits einen Rückgang darstellt. Vorherige Studien kamen mehrheitlich auf ungefähr 250 Jahre. Wird das R/C-Verhältnis mit den Daten aus dem USGS-Report 2015 berechnet, sind die heutigen K-Reserven schon in 101 Jahren erschöpft. Wird das R/C-Verhältnis, wie von verschiedenen AutorInnen gefordert, als früher Warnindikator verstanden (Hendrix, 2011; Scholz & Wellmer, 2013; Vaccari et al., 2014; Vaccari & Strigul, 2011; Walan et al., 2014), müsste hier definitiv die Gefahr erkannt werden. Wird die Tatsache miteinbezogen, dass im Gegensatz zu P und N den Böden weltweit viel mehr K durch die Ernte entzogen, als mit Dünger hinzugefügt wird (Manning, 2015), sieht die Situation noch prekärer aus. Manning (2015) hat berechnet, dass die Kaliumdüngung auf landwirtschaftlichen Böden weltweit mehr als verdoppelt werden müsste, um die Nährstoffbilanz auszugleichen.

Trotz den düsteren Perspektiven soll auch hier erwähnt werden, dass sich sämtliche Schätzungen der K-Reserven auf USGS-Daten stützen, die wie im vorangehenden Kapitel beschrieben, kritisch betrachtet werden müssen.

Wie beim P stellt sich beim K die Frage nach der Abhängigkeit von wenigen Ländern, die den grössten Teil der Reserven besitzen. Heute wird K hauptsächlich in Kanada, Russland und Weissrussland abgebaut und zu Dünger weiterverarbeitet (Ciceri et al., 2015). Diese Länder stellen nach heutigen Schätzungen zudem über 60% der noch vorhandenen Reserven (Jasinski, 2015b).

Als Alternativen zu mineralischen Kaliumdüngern kommt beispielsweise die Asche aus verbrannten Siedlungsabfällen in Frage. Dies ist aber heute grösstenteils nicht möglich, da in dieser Asche oft toxische Elemente und Verbindungen enthalten sind (Lam, Ip, Barford, & McKay, 2010). Auch Asche aus verbrannten Bäumen, anderen Pflanzen oder Algen könnten als K-Lieferant dienen (Ciceri et al., 2015; Maltas & Sinaj, 2014). Diesbezüglich muss aber bedacht werden, dass das Verbrennen von Pflanzen Landwirtschaftsfläche, das von Bäumen Waldfläche für den Anbau voraussetzt. Gemäss Ciceri et al. (2015) könnte damit der Weltbedarf nicht gedeckt werden.

Eine weitere mögliche K-Quelle ist Feldspat (Manning, 2015). Der Vorteil ist, dass er an vielen Orten in grossen Mengen vorkommt und nur langsam verwittert, was besonders für tropische Böden gut ist (Ciceri et al., 2015). Es ist jedoch noch unklar, ob das Gestein nicht zu langsam verwittert. Bisherige Forschungsergebnisse zeigen widersprüchliche Resultate (Ciceri et al., 2015; Manning, 2015).

In der biologischen Landwirtschaft wurden Erfolge mit dem Einsatz menschlicher und tierischer Fäkalien erzielt. Dabei ist allerdings umstritten, inwiefern diese Quellen den Bedarf an entzogenem K den Böden zurückgeben könnten (Ciceri et al., 2015; Honegger et al., 2014). Momentan wird auch in der Schweiz geforscht, wie aus Urin Kalium für den landwirtschaftlichen Gebrauch gewonnen werden kann (Etter & Udert, 2015).

Bezüglich Umweltauswirkungen stellt bei K-Minen die Verunreinigung von Gewässern das grösste Risiko dar. Neben den dokumentierten Fällen, in denen Oberflächengewässer verunreinigt wurden (Bäthe & Coring, 2011; Gorostiza Langa, 2014; Lepikhin et al., 2012) geben vor allem die Befürchtungen der Kontaminierung von Grundwasser Anlass zur Sorge (Saskatchewan ECO-Network, 2001; Vonhof, 1975). Im Kontext von weltweit begrenzten Trinkwasser-Ressourcen (UN, 2015b) sollte die Kontaminierung von Grundwasser auf jeden Fall verhindert werden. Zu konkreten Fällen von Grundwasserkontaminierung konnte keine Literatur gefunden werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, da die Befürchtungen bis jetzt nicht durch wissenschaftliche Studien belegt oder entkräftet wurden.

## **5.4 Weitere Aspekte im Kontext**

Die vorliegende Arbeit untersucht Risiken und Auswirkungen von NPK-Düngern nur in Bezug auf deren Herstellung. Da diese Düngemittel aber auch beim Ausbringen nicht unproblematisch sind und ihr Einsatz einen bedeutenden Einfluss auf die Welternährung hat, wird das folgende Kapitel diesen beiden Themen gewidmet.

## **Umweltauswirkungen von NPK-Düngern beim Ausbringen**

Diese Arbeit fokussiert auf die Auswirkungen und Risiken der Produktion von NPK-Düngern, daher wurden die Umweltbelastungen und Risiken beim Ausbringen der Dünger nicht beschrieben. Diese sind vor allem für die Elemente N (Galloway, 2013) und P (Butusov & Jernelöv, 2013) einschneidend. Da K in aquatischen Ökosystemen nicht limitierend wirkt, verursacht es im Gegensatz zu N und P weniger Umweltbelastungen (Sutton et al., 2013).

Die grossen Mengen an unter anderem in der Landwirtschaft ausgebrachtem N (Good & Beatty, 2011) tragen weltweit zu folgenden Problemen bei (Billen et al., 2013; Compton, Hill, & Dennis, 2013; Galloway, 2013; Good & Beatty, 2011; Grizzetti et al., 2011):

- Verringerung der Biodiversität durch Überdüngung verschiedener Land-Ökosysteme
- Versauerung und Verminderung der Biodiversität in Seen und Flüssen
- Verminderung der Habitat-Vielfalt und der Biodiversität in küstennahen Ökosystemen; N gilt als grösstes Umweltschutz-Problem in küstennahen Gewässern
- Verstärkung des Klimawandels
- Belastung von Grundwasser durch Nitrat

P ist unter anderem durch Austräge aus landwirtschaftlichen Flächen für die Überdüngung von Seen und Flüssen verantwortlich, wodurch die Trinkwasserqualität gefährdet und die Biodiversität verringert werden kann (Bennett, Carpenter, & Caraco, 2001; Butusov & Jernelöv, 2013; Carpenter, 2005).

## **Welternährung und Verteilungsgerechtigkeit**

Wird die Idee einer Nachhaltigen Entwicklung (World Commission on Environment and Development, 1987) ernst genommen, müssen die Bedürfnisse der gesamten Erdbevölkerung berücksichtigt werden. In Bezug auf die NPK-Dünger ist daher vor allem die Frage des Zugangs zu zahlbaren Düngemitteln zentral.

Gemäss den Ergebnissen dieser Arbeit kann davon ausgegangen werden, dass in nächster Zeit die einfach abbaubaren K-Reserven erschöpft sein werden. Nach K werden bald auch die einfach abbaubaren fossilen Energieträger und P-Vorkommen knapp.

Scholz und Wellmer (2013) gehen davon aus, dass die P-Preise steigen, da die Reserven mit hohen Erzgehalten zuerst gefördert werden. Die Förderung der schwieriger abbaubaren Reserven benötigt dann mehr Energie, Wasser und Arbeit, was den Preis in die Höhe treiben wird (Scholz & Wellmer, 2013). Crews und Peoples (2004) fügen an, dass die Düngerpreise steigen, wenn die fossilen Brennstoffe knapper werden, da vor allem Stickstoffdünger stark von fossilen Energieträgern abhängig ist.

Da P nur einen kleinen Teil der menschlichen Nahrung ausmacht, würde auch eine Verdoppelung des Preises nur einen geringen Einfluss auf die Nahrungsmittelpreise haben (Scholz & Wellmer, 2013). Dies gilt allerdings nur für die wohlhabenden KonsumentInnen, für kleine Bauern mit wenig finanziellen Mitteln könnten Preissteigerungen massive Auswirkungen haben (Cordell & Neset, 2014; Cordell et al., 2011; Scholz & Wellmer, 2013). Dazu kommt, dass sich bereits schon heute viele arme Bauern keine mineralischen Düngemittel leisten können (Cordell et al., 2011).

Der Verbrauch der endlichen fossilen Brennstoffe und der P- und K-Reserven hat auch damit zu tun, wie viel konsumiert wird (Odegard & van der Voet, 2014). Es leuchtet ein, dass durch veränderte Ernährungsgewohnheiten die P- und K-Reserven einiges länger halten würden (Crews & Peoples, 2004; IAASTD, 2009; Odegard & van der Voet, 2014). Dabei geht es vor allem um einen verringerten Konsum an Milch- und Fleischprodukten in den Industrienationen, da tierische Nahrungsmittel für dieselbe Menge an Proteinen viel mehr Ressourcen benötigen als pflanzliche Nahrung (Odegard & van der Voet, 2014; Smil, 2001). Heute wird schätzungsweise über ein Drittel der globalen fruchtbaren Ackerfläche für die Erzeugung von Tiernahrung verwendet (Manceron, Ben-Ari, & Dumas, 2014). Zusätzlich kann die Verringerung von „Food waste“ dazu beitragen, dass die Ressourcen-Effizienz von eingesetzten Düngemitteln zunimmt (Crews & Peoples, 2004). Auch das Thema der Reichweite der fossilen Rohstoffe hängt stark mit der Nachfrage zusammen. Entscheidend ist hier unter anderem, wie schnell die grossen erdölverbrauchenden Länder ihre Wirtschaft auf erneuerbare Energien umstellen (Ahlgren et al., 2010).

Schlussendlich sollte auch die Frage gestellt werden, ob es nicht speziell bei ärmeren, kleineren Landwirtschaftsbetrieben nachhaltiger wäre, auf endlichen Ressourcen basierende mineralische Düngemittel zu verzichten und auf biologische Landwirtschaft umzustellen.

## 5.5 Karten-Diskussion

Die Erstellung der Karten in dieser Arbeit (siehe Kapitel 4.6) war mit verschiedenen Schwierigkeiten verbunden. Nachfolgend werden diese Schwierigkeiten thematisch diskutiert und aufgezeigt, wie sie in den definitiven Karten gelöst wurden.

### Grosse Skalen

Bei der Darstellung der verbleibenden P-Reserven liegt die Herausforderung darin, dass die Zahlen der einzelnen Länder eine sehr grosse Bandbreite umfassen. Die P-Reserven in Marokko sind mit 50'000'000 Kt über zehn Mal höher als im nachfolgenden Land China, das über 3'700'000 Kt Reserven verfügt (Jasinski, 2015a). Das Problem kommt in den Karte in Abbildung 22 und Abbildung 25 gut zum Ausdruck. Damit Unterschiede zwischen den Reserven der einzelnen Länder gut sichtbar werden, wurde in Abbildung 25 die Grösse des Balkens in Marokko so gross gewählt,



dass er über die Karte hinaus reicht. Die in Abbildung 22 gewählte Grösse lässt die Balken in verschiedenen Ländern praktisch verschwinden. Um das Problem zu lösen könnte die Balkengrösse wie auf Abbildung 22 gewählt, aber eine Mindestgrösse definiert werden. Diese Massnahme würde aber das Problem nicht lösen, dass Reserven-Unterschiede zwischen dem grössten Teil der Länder nicht erkennbar sind. Alternativ könnte die Balkenlänge sehr gross ausgewählt, der P-Reserven-Balken in Marokko aber graphisch „gebrochen“ werden (siehe Abbildung 30). Dies würde allerdings die korrekte Aussage der Karte verfälschen, da dann nicht mehr abgeschätzt werden könnte, wie gross der Balken wirklich ist.

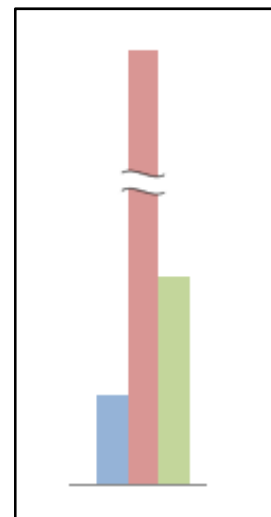


Abbildung 30: "gebrochener" Balken in einer Excel-Statistik (Peltier, 2011)

Das Problem der grossen Unterschiede der Datengrundlage könnte auch mit Klassifizierung entschärft werden. In Abbildung 23 sind die P- und K-Reserven aus dem Jahr 2014 als braune und türkisfarbene Haufen dargestellt. Da die Klassen für die Symbolgrössen für P und K verschieden sind, sind die Unterschiede innerhalb des jeweiligen Elements gut sichtbar. Die Klassifizierung führt aber auch zu einem verzerrten Bild, da die Reserven in Marokko im Vergleich zu den restlichen Ländern nicht massiv grösser erscheinen. Durch ein grösseres Symbol der grössten P-Reserven-Klasse könnte dieses Problem teilweise entschärft werden.

Die Darstellung von Daten mit grosser Bandbreite kann auch anders gelöst werden. Schröder et al. (2010) haben auf der Karte in Abbildung 18 nur die grössten Länder rot markiert und die Zahlen der P-Reserven als Ziffern auf die Karte platziert. Somit entfällt das Problem der grossen Unterschiede komplett. Das BGR (2014) wählte für die Darstellung der weltweiten P-Reserven auf der Karte in Abbildung 16 Kreiszyylinder. Die Grösse der Kreiszyylinder ist so gewählt, dass auch Unterschiede zwischen den Ländern mit niedrigen Reserven wie beispielsweise China, Russland und Brasilien noch erkennbar sind. Allerdings sind die Kreiszyylinder bei den Ländern mit den niedrigsten Reserven fast nicht mehr zu erkennen.

In den definitiven Karten dieser Arbeit wurde das Problem so gelöst, dass die Reserven farblich und nicht als Balken dargestellt wurden (siehe Abbildung 26 und Abbildung 28). Da bei den P-Produktionsraten die Unterschiede zwischen den Ländern ebenfalls sehr gross sind, wurde in Abbildung 26 eine Mindestgrösse der Balken gewählt.

### Verschiedene Ressourcen auf einer Karte

Die Darstellung von P- und K-Reserven auf einer Karte ist mit verschiedenen Schwierigkeiten verbunden.

Ein Teil des Problems besteht auch hier in den grossen Skalen-Unterschieden. Hier aber nicht innerhalb, sondern zwischen den verschiedenen Ressourcen. Die grössten P-Reserven sind in Marokko mit 50'000'000 Kt ungefähr 45 Mal grösser als die grössten K-Reserven in Kanada mit 1'100'000 Kt (Jasinski, 2015a, 2015b). Die Unterschiede sind also noch grösser als die Unterschiede der P-Reserven zwischen den Ländern.

Wird die Balken-Grösse zu klein gewählt (Abbildung 22), sind die Unterschiede der K-Reserven zwischen den verschiedenen Ländern praktisch nicht mehr sichtbar. Wird sie zu gross gewählt (Abbildung 25), reicht der Balken der P-Reserven in Marokko über den Bildschirmrand hinaus. Wie im vorherigen Abschnitt wäre hier das „halbieren“ des Balkens in Marokko eine Lösung, wäre aber auch mit den beschriebenen negativen Aspekten gekoppelt. Die Lösung mit klassifizierten Symbolen wie in Abbildung 23 verzerrt die Aussage, da es so auf den ersten Blick scheint, als gäbe es global ungefähr die gleiche Menge an P- und K-Reserven.

Die von Möckli (2008) erstellte Karte (siehe Abbildung 13) stellt diverse Ressourcen auf einer Karte dar. Allerdings wurde abgesehen von Erdöl und Erdgas darauf verzichtet, die Grösse der Reserven graphisch darzustellen. Die Darstellung der Erdöl- und Erdgas-Reserven scheint keine graphische Herausforderung darzustellen, da die Mengen der beiden Ressourcen in den afrikanischen Ländern nicht so unterschiedlich sind wie die weltweiten P- und K-Reserven.

Das Problem der verschiedenen Ressourcen auf einer Karte wurde in den definitiven Karten umgangen, indem für jede Ressource eine eigene Karte angefertigt wurde.

## **Farbwahl**

Die Farbwahl ist nicht nur in Bezug auf die Verständlichkeit einer Karte zentral (siehe Abbildung 13), sondern hat auch Einfluss darauf, wie der Inhalt gedeutet wird (Ware, 2013). Gemäss Ware (2013) ist die Interpretation der Farben je nach Region unterschiedlich.

Die Darstellung der Reserven mit den Farben Grün, Gelb und Rot auf der Karte in Abbildung 24 ist irreführend. Das Grün von China ist visuell nicht gut vom dunkleren Grün in Marokko zu unterscheiden, obwohl der Reserven-Unterschied zwischen den Ländern mehr als das Zehnfache beträgt. Ausserdem kann die Darstellung in Rot und Grün dazu führen, dass beispielsweise Chinas Reserven als unproblematisch eingestuft werden, was gemäss Manning (2015) nicht der Fall ist.

In gewissen Fällen kann die Wertung durch Farben sinnvoll sein. So scheint die Darstellung der Wasserversorgung auf der Karte der UN (2015b) in Abbildung 15 durchaus sinnvoll. Die Farbwahl von Blau für eine gute Versorgung mit Wasser bis Rot für die Länder, in denen die Versorgung kritisch ist, ist angemessen. Auch in der vom BGR (2014) veröffentlichten Karte in Abbildung 16 scheint die Farbwahl passend. Hier wird das Länderrisiko mit Farben von Rot über Gelb zu Grün dargestellt, was für die Darstellung eines Risikos vertretbar ist.

Um eine Wertung durch die Farben Rot und Grün zu vermeiden, wurde in den definitiven Karten eine Farbskala zwischen Gelb und Braun gewählt.

### **Aussage zur Reichweite der Reserven**

Um eine Aussage über die Reichweite der Reserven machen zu können muss neben der Zahl der Reserven zwingend auch die Information der Abbaurate in eine Karte einfließen. In den ersten beiden Karten-Entwürfen ist dies nicht der Fall (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23). In der Karte auf Abbildung 24 sind zwar die Abbauraten sichtbar, es fällt aber schwer, sich vorzustellen, wie lange die Reserven der einzelnen Länder noch reichen werden. Abbildung 25 zeigt als einzige der Entwurfs-Karten eine Voraussage anhand der R/C-Methode. Der Informationsgehalt ist dennoch beschränkt, da nicht ersichtlich ist, ab wann ein Land keine Reserven mehr hat.

In den in Kapitel 4.5 zusammengestellten Karten lässt einzig die Karte vom BGR (2014) publizierte Karte eine Voraussage zur Reserven-Reichweite zu (siehe Abbildung 16). Sie ist die einzige der aufgelisteten Karten, die neben den Reserven auch die Produktionsleistungen der einzelnen Länder darstellt. Hier fällt es aber ebenfalls schwer, sich vorzustellen, wie lange die Reserven noch reichen, besonders, weil die Reserven als Kreis, die Produktionsraten aber als Balken dargestellt sind.

Die gewonnenen Erkenntnisse führten zur Erstellung je einer Haupt-Karte für P und K und je einer Karte „small multiples“, die vier Karten enthalten, welche eine mögliche Reserven-Entwicklung in den nächsten 80 Jahren aufzeigen.

### **Berechnung der Reserven-Reichweite**

Die Methoden zur Berechnung der Reserven-Reichweite sind, wie in dieser Arbeit dargelegt wird, umstritten (siehe Kapitel 4.2.2). Für die kartographische Darstellung der Karten in dieser Arbeit wurde ausschliesslich die R/C-Methode verwendet, da diese oft angewandt wird (siehe Kapitel 4.2.2) und als Ergebnis eine Zahl liefert. Die Methode wurde dahingehend verändert, dass ein jährliches Produktions-Wachstum von 1% angenommen wird. Die Anwendung der Methode auf verschiedene Länder anstatt auf die globalen Reserven ist allerdings nicht unproblematisch. Die Frage stellt sich, welches Land die Produktion übernimmt, wenn ein Land seine Reserven ausgeschöpft hat. Die Methode wurde bei der Karte in Abbildung 25 falsch angewendet. Die Berechnung der Reserven-Reichweite ist falsch, weil wenn ein Land seine Reserven aufgebraucht hat, seine Produktionsleistung nicht auf die anderen Länder übertragen wurde. Somit sinkt die globale Produktionsleistung jedes Mal, wenn in einem Land die Reserven erschöpft sind.

In den definitiven Karten dieser Arbeit wurde die von Cooper et al. (2011) benutzte Methode angepasst und verwendet. Wenn ein Land zu einem bestimmten Zeitpunkt keine Reserven mehr hat, wird seine Produktionskapazität auf die anderen Länder verteilt. Dabei wird die neue Produktions-

menge prozentual anhand der in den Ländern noch verfügbaren Reserven verteilt. Beispielsweise übernimmt Marokko mit der Zeit immer mehr der Produktion von „aussteigenden“ Produktionsländern, da es mit Abstand am meisten Reserven besitzt. Die Produktion steigt somit in diesem Land viel stärker an als in sämtlichen anderen Ländern.

Die Berechnungen für die erstellten Karten gehen teilweise von anderen Annahmen aus als diejenige von Cooper et al. (2011). In der vorliegenden Arbeit steigt die gesamte P-Produktionsmenge aus dem Jahr 2014 bis ins Jahr 2094 konstant um 1%, wogegen Cooper et al. (2011) annehmen, sie steige bis ins Jahr 2050 pro Jahr um 1% und bleibe dann konstant. Dasselbe gilt für die K-Produktion. Bei dieser wird in der vorliegenden Arbeit eine jährliche Erhöhung der Produktion um 1% angenommen, während Jasinski (2014b) einen Anstieg von 3% pro Jahr annimmt und gemäss Manning (2015) die Kaliumdüngung stark zunehmen müsste, um die weltweit ausgelaugten Böden zu sanieren.

### **Aussage zur Abhängigkeit von Phosphor und Kalium**

Zusätzliche zu den Aussagen in den definitiven Karten wäre es interessant, den Konsum und die Produktion von NPK-Düngern verschiedener Länder zu vergleichen und deren Abhängigkeit davon zu visualisieren. Die Umsetzung dieser Idee scheiterte jedoch daran, dass keine Daten gefunden werden konnten, die hätten verglichen werden können. Die Daten der FAO-Datenbank (FAO, 2015) stimmen nicht mit den Daten des USGS überein (Jasinski, 2014b). Während die FAO für Nordamerika (USA und Kanada) im Jahr 2012 auf einen Konsum von  $P_2O_5$  in Düngemitteln von 4'712 Kt kommt (FAO, 2012, 2015), wird im USGS-Report ein Wert von 30'400 Kt alleine für die USA angegeben (Jasinski, 2014a). Aus den Publikationen und Webseiten der FAO und des USGS wird nicht ersichtlich, wie die Zahlen zum Konsum berechnet wurden.

Der Vergleich von Produktion und Konsum würde zwar die Abhängigkeit von Phosphordünger der verschiedenen Länder aufzeigen, allerdings ist es fraglich, ob damit wirklich eine glaubhafte kartographische Aussage gemacht werden könnte. Alle Länder, die zwar selber nur wenig Phosphordünger importieren, aber dafür grosse Mengen an Nahrung, würden in so einer Karte als „unabhängig“ dargestellt, könnten aber durch importierte Nahrungsmittel trotzdem stark von Phosphordüngemitteln abhängig sein.

## 5.6 Schlussfolgerungen

Aus den Resultaten können verschiedene Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Damit können die zu Beginn der Arbeit gestellten Fragen bezüglich der Risiken und Auswirkungen von NPK-Düngern beantwortet werden. Die in der nachfolgenden Liste zusammengestellten Aussagen sind in Abbildung 31 zusammengefasst.

- Prognosen bezüglich der Reichweite von P- und K-Reserven sind schwierig, da die zugrunde liegenden Daten immer wieder revidiert werden und die angewandten Schätzungsmethoden umstritten sind.
- Gemäss den Daten des USGS-Reports 2015 (USGS, 2015a) kann davon ausgegangen werden, dass die P-Reserven in naher Zukunft nicht zur Neige gehen werden. Die Situation der K-Reserven scheint schlechter, da die Reserven in den Jahren 2014 und 2015 massiv nach unten korrigiert wurden (Jasinski, 2014b, 2015b).
- Dass die Reserven nicht in nächster Zeit aufgebraucht sein werden, leuchtet ein. Dass mit der Verknappung in naher Zukunft ein Anstieg der Preise zu befürchten ist, ebenfalls.
- Die Ressourcen für Stickstoffdünger (N und H) werden schätzungsweise noch längere Zeit nicht knapp werden, da sie direkt aus der Luft (78% der Luft besteht aus N) oder aus diversen, auch erneuerbaren Quellen (H aus Kohle, Erdgas, Biogas) gewonnen werden können. Da die Herstellung von Ammoniak aber sehr energieintensiv ist und die fossilen Brennstoffe zur Neige gehen, wird auch hier in absehbarer Zeit eine Preiserhöhung zu erwarten sein.
- Bezüglich der direkten, negativen Umweltauswirkungen stehen der P-Abbau und die nachgeschaltete Düngerproduktion an der Spitze. Der in grossen Mengen anfallende und oft unsachgemäss gelagerte Phosphorgips verursacht in vielen Ländern grosse Umweltschäden. Für Umweltschäden beim Abbau von K gibt es weniger Belege. Allerdings ist auch hier offensichtlich, dass falsch gelagerte oder entsorgte Salzlake grosse Umweltschäden verursachen kann. Zuunterst auf der Skala der direkten Umweltauswirkungen steht N, bei dem lediglich metallhaltiger Katalysator als Abfall anfällt. Zu diesem Thema existieren nicht genug Quellen, die dies als ein grösseres Problem darstellen
- Der Gesamtenergieverbrauch der Stickstoffdünger-Herstellung ist massiv (1.2% der weltweit verwendeten Energie) und benötigt über 36% des gesamten Verbrauchs an fossilen Brennstoffen in der Landwirtschaft. Der Verbrauch für die Herstellung von Kalium- und Phosphordünger scheint im Vergleich vernachlässigbar.

Risiko / Auswirkung	Stickstoff	Phosphor	Kalium
Reserven	Problematisch: Erdgas-Reserven	Unproblematisch: In den nächsten Jahrzehnten wahrscheinlich kein Problem	Problematisch: Gemäss aktuellen Schätzungen knappe Reserven
Umweltauswirkungen	Unproblematisch: Keine grossen Umweltschäden dokumentiert	Problematisch: grosse und wahrscheinlich in Zukunft noch stark zunehmende radioaktiv strahlende und schwermetallbelastete Phosphorgips-Abfälle	Problematisch: Befürchtete und beobachtete Versalzung von Oberflächengewässern und Grundwasser
Energieverbrauch	Problematisch: Sehr grosser Energieverbrauch	Unproblematisch: Vernachlässigbarer Energieverbrauch	Unproblematisch: Vernachlässigbarer Energieverbrauch

**Abbildung 31: Zusammenfassung der Risiken und Auswirkungen der N, P, und K-Düngerherstellung und ihre Problematik**

## 5.7 Ausblick

Noch in diesem Jahrhundert wird sich entscheiden, ob das Problem knapper werdender Ressourcen in der Landwirtschaft rechtzeitig gelöst wird. In Bezug auf die in Kapitel 2 erwähnten Beispiele stellt sich die Frage, ob die Welt auf eine Ressourcenkatastrophe wie in Nauru oder Nordkorea zusteuert oder ob ein Wechsel zu nachhaltigeren Anbaumethoden wie in Kuba gelingen wird.

Voraussagen über einen Zeithorizont von mehreren Jahrzehnten sind mit grossen Unsicherheiten behaftet. Es scheint aber unvermeidbar, dass durch den weltweit steigenden Milch- und Fleischkonsum sowie das Bevölkerungswachstum die Verwendung von NPK-Düngern weiter zunehmen wird. Sehr wahrscheinlich ist auch, dass, wenn die einfach verfügbaren Reserven abnehmen, die Preise der Düngemittel steigen werden.

Soll das Ziel der letzten UN-Konferenz in Addis Abbeba, den Hunger und die Armut auf der Welt zu beenden (UN, 2015a), nicht nur ein leeres Versprechen bleiben, muss unter anderem auch im Bereich der Düngemittel gehandelt werden. Der Fokus sollte darauf liegen, vor allem bei Kleinbauern die Abhängigkeit von international gehandelten NPK-Düngern zu reduzieren. Sonst werden sie die Ersten sein, die durch steigende Düngerpreise nicht mehr genug Nahrung produzieren können.

Für die Forschung wäre es wünschenswert, wenn mehr Ressourcen dahingehend investiert würden, wie die Nährstoffe N, P und K möglichst günstig und effizient aus alternativen Quellen wie beispielsweise menschlichen Fäkalien gewonnen werden können. Um die kommenden Engpässe in P- und K-Reserven möglichst früh und verlässlich zu erkennen, wäre ein internationales Komitee, das speziell für diese Ressourcen verlässliche Daten sammelt und veröffentlicht, wie es Scholz und Wellmer (2015a) fordern, ein Schritt in die richtige Richtung. Global nicht so dringlich, aber lokal umso mehr wären Untersuchungen zu sämtlichen P- und K-Minen bezüglich ihrer Umweltauswirkungen. Neu gewonnene Erkenntnisse bezüglich Umweltbelastungen und Reserven von NPK-Düngern sollten am besten kartographisch dargestellt werden und einem breiten Publikum zur Verfügung gestellt werden.

## 6 Literaturverzeichnis

- Ahlgren, S., Bernesson, S., Nordberg, Å., & Hansson, P. A. (2010). Nitrogen fertiliser production based on biogas - Energy input, environmental impact and land use. *Bioresource Technology*, 101(18), 7181–7184. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.006>
- Ahmad, N., & Baddour, R. E. (2014). A review of sources, effects, disposal methods, and regulations of brine into marine environments. *Ocean and Coastal Management*, 87, 1–7. <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.10.020>
- Al Rawashdeh, R., & Maxwell, P. (2014). Analysing the world potash industry. *Resources Policy*, 41, 143–151. <http://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.05.004>
- Aoun, M., El Samrani, A. G., Lartiges, B. S., Kazpard, V., & Saad, Z. (2010). Releases of phosphate fertilizer industry in the surrounding environment: Investigation on heavy metals and polonium-210 in soil. *Journal of Environmental Sciences*, 22(9), 1387–1397. [http://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60247-3](http://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60247-3)
- Badgley, C., Moghtader, J., Quintero, E., Zakem, E., Chappell, M. J., Avilés-Vázquez, K., ... Perfecto, I. (2007). Organic agriculture and the global food supply. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 22(02), 86. <http://doi.org/10.1017/S1742170507001640>
- Bardi, U., El Asmar, T., & Lavacchi, A. (2013). Turning electricity into food: The role of renewable energy in the future of agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 53, 224–231. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.014>
- Bartels, J. J., & Gurr, T. M. (1994). Phosphate Rock. In *Industrial minerals and rocks* (6. Aufl., S. 751–764). Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- Bartz, D., Beste, A., Brent, Z., Chemnitz, C., Dunbar, M., Ehlers, K., ... Wilson, J. (2015). *Bodenatlas 2015*. (C. Chemnitz & J. Weigelt, Hrsg.) (1. Aufl.).
- Bäthe, J., & Coring, E. (2011). Biological effects of anthropogenic salt-load on the aquatic Fauna: A synthesis of 17 years of biological survey on the rivers Werra and Weser. *Limnologica*, 41, 125–133. <http://doi.org/10.1016/j.limno.2010.07.005>
- Bennett, E. M., Carpenter, S. R., & Caraco, N. F. (2001). Human Impact on Erodable Phosphorus and Eutrophication: A Global Perspective. *BioScience*, 51(3), 227. [http://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0227:HIOEPA\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0227:HIOEPA]2.0.CO;2)
- Bentley, R. W. (2002). Global oil and gas depletion: An overview. *Energy Policy*, 30(3), 189–205. [http://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00144-6](http://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00144-6)
- Benton, J. (2012). *Plant Nutrition and Soil Fertility Manual* (2. Aufl.). CRC Press.
- BGR. (2014). *Phosphat Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe*. Hannover.
- Billen, G., Garnier, J., & Lassaletta, L. (2013). The nitrogen cascade from agricultural soils to the sea: modelling nitrogen transfers at regional watershed and global scales. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 368, 20130123. <http://doi.org/10.1098/rstb.2013.0123>

- Braukmann, U., & Böhme, D. (2011). Salt pollution of the middle and lower sections of the river Werra (Germany) and its impact on benthic macroinvertebrates. *Limnologica*, 41(2), 113–124. <http://doi.org/10.1016/j.limno.2010.09.003>
- Burger, K. (2015). Grenzen des Rohstoffabbaus: Wenn der Phosphor ausgeht. Abgerufen 9. Juli 2015, von <http://www.taz.de/!5021369/>
- Butusov, M., & Jernelöv, A. (2013). *Phosphorus: An Element that could have been called Lucifer*.
- Carpenter, S. R. (2005). Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(29), 10002–10005. <http://doi.org/10.1073/pnas.0503959102>
- Ciceri, D., Manning, D., & Allanore, A. (2015). Historical and technical developments of potassium resources. *Science of The Total Environment*, 502, 590–601. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.013>
- Compton, J. E., Hill, B., & Dennis, R. (2013). *Connecting Nitrogen Deposition and Ecosystem Services. Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources* (Bd. 4). Elsevier. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00403-2>
- Connell, J. (2006). Nauru: The first failed Pacific State? *The Round Table*, 95(383), 47–63. <http://doi.org/10.1080/00358530500379205>
- Cooper, J., Lombardi, R., Boardman, D., & Carliell-Marquet, C. (2011). The future distribution and production of global phosphate rock reserves. *Resources, Conservation and Recycling*, 57(January), 78–86. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.009>
- Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19, 292–305. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Cordell, D., & Neset, T. S. S. (2014). Phosphorus vulnerability: A qualitative framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multi-dimensional stressors of phosphorus scarcity. *Global Environmental Change*, 24, 108–122. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.11.005>
- Cordell, D., White, S., & Lindström, T. (2011). Peak phosphorus: the crunch time for humanity? Abgerufen 7. Mai 2015, von <https://thesustainabilityreview.org/peak-phosphorus-the-crunch-time-for-humanity/>
- Crews, T. E., & Peoples, M. B. (2004). Legume versus fertilizer sources of nitrogen: Ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 102, 279–297. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.018>
- Déry, P. (2013). Phosphor: brauchen wir einen Paradigmenwechsel? In *Der geplünderte Planet: Die Zukunft des Menschen im Zeitalter schwindender Ressourcen* (S. 215–220).
- Déry, P., & Anderson, B. (2007). Peak phosphorus Prospect of a Phosphorus Peak.
- Edixhoven, J. D., Gupta, J., & Savenije, H. H. G. (2013). Recent revisions of phosphate rock reserves and resources: reassuring or misleading? An in-depth literature review of global



- estimates of phosphate rock reserves and resources. *Earth System Dynamics Discussions*, 4, 1005–1034. <http://doi.org/10.5194/esdd-4-1005-2013>
- Etter, B., & Udert, K. M. (2015). Aus Urin wird Flüssigdünger. *eawag news*, (01), 1–8.
- FAO. (2012). *Current world fertilizer trends and outlook to 2016*. Rom.
- FAO. (2015). FAOSTAT. Abgerufen 7. Juli 2015, von <http://faostat3.fao.org/home/E>
- FAO, IFAD, & WFP. (2015). *The State of Food Insecurity in the World. Meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress*. Rome: FAO.
- Fixen, P. E., & Johnston, A. M. (2012). World fertilizer nutrient reserves: A view to the future. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(January 2011), 1001–1005. <http://doi.org/10.1002/jsfa.4532>
- Frink, C. R., Waggoner, P. E., & Ausubel, J. H. (1999). Nitrogen fertilizer: Retrospect and prospect. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(February), 1175–1180. <http://doi.org/10.1073/pnas.96.4.1175>
- Galloway, J. N. (2013). *The Global Nitrogen Cycle. Treatise on Geochemistry: Second Edition* (2. Aufl., Bd. 10). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00812-3>
- Galloway, J. N., Townsend, A. R., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J. R., ... Sutton, M. A. (2008). Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science (New York, N.Y.)*, 320(May), 889–892. <http://doi.org/10.1126/science.1136674>
- Gaudry, A., Zeroual, S., Gaie-Levrel, F., Moskura, M., Boujral, F. Z., El Moursli, R. C., ... Delmas, R. (2007). Heavy metals pollution of the atlantic marine environment by the Moroccan phosphate industry, as observed through their bioaccumulation in *Ulva lactuca*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 178(1-4), 267–285. <http://doi.org/10.1007/s11270-006-9196-9>
- Gilbert, N. (2009). Environment: The disappearing nutrient. *Nature*, 461(October), 716–718. <http://doi.org/10.1038/461716a>
- Gnandi, K., Tchangbedji, G., Killi, K., Baba, G., & Abbe, K. (2006). The impact of phosphate mine tailings on the bioaccumulation of heavy metals in marine fish and crustaceans from the coastal zone of Togo. *Mine Water and the Environment*, 25(1), 56–62. <http://doi.org/10.1007/s10230-006-0108-4>
- Goldfarb, R. J., Baker, T., Dubé, B., Groves, D., Hart, C., & Gosselin, P. (2005). Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 407–450.
- Good, A. G., & Beatty, P. H. (2011). Fertilizing nature: A tragedy of excess in the commons. *PLoS Biology*, 9(8), 1–9. <http://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001124>
- Gorostiza Langa, S. (2014). Potash Extraction and Historical Environmental Conflict in the Bages Region (Spain). *Investigaciones Geográficas*, 61, 5–16. <http://doi.org/10.14198/INGEO2014.61.01>

- Grizzetti, B., Bouraoui, F., Billen, G., van Grinsven, H., Cardoso, A. C., Thieu, V., ... Johnes, P. (2011). Nitrogen as a threat to European water quality, 379–404. <http://doi.org/10.1126/science.333.6046.1083>
- Gusev, A. P. (2006). Primary succession on phosphogypsum dumps (Gomel Chemical Plant, Belarus). *Russian Journal of Ecology*, 37(3), 210–212. <http://doi.org/10.1134/S1067413606030118>
- Haggard, S., & Noland, M. (2009). Famine in North Korea Redux? *Journal of Asian Economics*, 20, 384–395. <http://doi.org/10.1016/j.asieco.2009.04.002>
- Heffer, P. (2013). *Assessment of Fertilizer Use by Crop at the Global Level*. Paris.
- Hendrix. (2011). Applying Hubbert Curves and linearization to Rock Phosphate, (november), 12.
- Honegger, A., Wittwer, R., Hegglin, D., Oberholzer, H.-R., De Ferron, A., & Jeanneret, P. (2014). Auswirkungen langjähriger biologischer Landwirtschaft. *Agrarforschung Schweiz*, 5(2), 44–51.
- IAASTD. (2009). *Agriculture at a Crossroads: Global Report. Global Report*. <http://doi.org/10.1080/03066150903155008>
- IFDC. (2015). IFDC-Webseite. Abgerufen 24. Juni 2015, von <http://ifdc.org/>
- IPCC. (2015). IPCC-Webseite. Abgerufen 24. Juni 2015, von <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml>
- Jaffe, K., Galdo, Q., Wanger, D. R., Busch, E., Abbott, M. C., Waring, E., & Costa, T. (2013). *Food: An Atlas*. (D. Jensen & M. Roy, Hrsg.). Oakland: Guerrilla Cartography.
- Jasinski, S. M. (2000). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 124–125.
- Jasinski, S. M. (2001). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 120–121.
- Jasinski, S. M. (2002). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 122–123.
- Jasinski, S. M. (2003). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 124–125.
- Jasinski, S. M. (2004). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 122–123.
- Jasinski, S. M. (2005). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 122–123.
- Jasinski, S. M. (2006). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 124–125.
- Jasinski, S. M. (2007). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 120–121.
- Jasinski, S. M. (2008). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 124–125.
- Jasinski, S. M. (2009a). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 120–121.
- Jasinski, S. M. (2009b). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 124–125.
- Jasinski, S. M. (2010a). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 118 – 119.

- Jasinski, S. M. (2010b). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 122–123.
- Jasinski, S. M. (2011a). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 118–119.
- Jasinski, S. M. (2011b). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 122–123.
- Jasinski, S. M. (2012a). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 118–119.
- Jasinski, S. M. (2012b). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 122–123.
- Jasinski, S. M. (2013a). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 118 – 119.
- Jasinski, S. M. (2013b). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 122–123.
- Jasinski, S. M. (2014a). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 118–119.
- Jasinski, S. M. (2014b). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 122–123.
- Jasinski, S. M. (2015a). Phosphate Rock. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 118–119.
- Jasinski, S. M. (2015b). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 122–123.
- Kalverkamp, M. Á., Bayer, W., Benning, R., Börnecke, S., Chemnitz, C., Hansen-Kuhn, K., ... Zastiral, S. (2015). *Fleischatlas 2014*. (C. Chemnitz & R. Benning, Hrsg.) (5. Aufl.).
- Kauwenbergh, S. J. (2010). World Phosphate Rock Reserves and Resources. *IFDC*.
- Kauwenbergh, S. J., Stewart, M., & Mikkelsen, R. (2013). World Reserves of Phosphate Rock... a Dynamic and Unfolding Story. *Better Crops*, 97, 18–20.
- Koechlin, F. (2002, Mai 23). Biolandbau als Vorwärtsstrategie. *WOZ - Die Wochenzeitung*, S. 1–2. Zürich.
- Kostick, D. S. (2006). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 128–129.
- Kostick, D. S. (2007). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 124–125.
- Kraus, H. (2004). *Die Atmosphäre der Erde – eine Einführung in die Meteorologie* (3. Aufl.). Springer.
- Lam, C. H. K., Ip, A. W. M., Barford, J. P., & McKay, G. (2010). Use of incineration MSW ash: A review. *Sustainability*, 2(7), 1943–1968. <http://doi.org/10.3390/su2071943>
- Lepikhin, A. P., Lyubimova, T. P., Pshakova, Y. N., & Tiunov, A. A. (2012). Discharge of Excess Brine into Water Bodies at Potash Industry Works, 48(2), 390–397.
- Lienhard, J.-P. (2006). 102 Jahre Pottasche im Kalibecken. Abgerufen 9. Juli 2015, von [http://www.webjournal.ch/article.php?article\\_id=703](http://www.webjournal.ch/article.php?article_id=703)
- Lister, T. (2012). Rising sea level puts island nations like Nauru at risk. Abgerufen 15. Juli 2015, von <http://edition.cnn.com/2012/12/04/world/asia/nauru-ocean-danger/>

- Los Turistos. (2015). Abgerufen von <http://www.touristos.fr/Outils/localisation-mini.html>
- Lottermoser, B. (2010). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts* (3rd Aufl.). Springer.
- Lutz, C., Lehr, U., & Wiebe, K. S. (2012). Economic effects of peak oil. *Energy Policy*, 48, 829–834. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.017>
- MacDonald, G. K., Bennett, E. M., Potter, P. A., & Ramankutty, N. (2011). Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(7), 3086–3091. <http://doi.org/10.1073/pnas.1010808108>
- Maltas, A., & Sinaj, S. (2014). Holzasche: ein neuer Dünger für die Landwirtschaft. *Agrarforschung Schweiz*, 5(6), 232–239.
- Manceron, S., Ben-Ari, T., & Dumas, P. (2014). Feeding proteins to livestock: Global land use and food vs. feed competition, 21(4), 10.
- Manning, D. (2015). How will minerals feed the world in 2050? *Proceedings of the Geologists' Association*, 126(1), 14–17. <http://doi.org/10.1016/j.pgeola.2014.12.005>
- Mayer, A. (2006). 50 Gramm Salz in einem Liter Wasser. Abgerufen 6. April 2015, von <http://www.stattweb.de/baseportal/ArchivDetail&db=Archiv&Id=708>
- McClellan, G. H., & Van Kauwenbergh, S. J. (2004). World phosphate deposits. Abgerufen 5. Mai 2015, von <http://www.fao.org/docrep/007/y5053e/y5053e07.htm#bm07.2>
- Möckli, D. (2008). Afrikas zunehmende strategische Bedeutung. *CSS Analysen zur Sicherheitspolitik*, (38).
- Mohr, S. H., & Evans, G. (2013). Projections of Future Phosphorus Production. Abgerufen 7. Mai 2015, von [http://philica.com/display\\_article.php?article\\_id=380](http://philica.com/display_article.php?article_id=380)
- Mohr, S. H., Wang, J., Ellem, G., Ward, J., & Giurco, D. (2015). Projection of world fossil fuels by country. *Fuel*, 141, 120–135. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.030>
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(33), 13268–13272. <http://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>
- Motavalli, P. (2014). Fertilizer facts. *Agriculture*, (July), 2014.
- Natural Earth. (2015). Abgerufen 20. Juni 2015, von <http://www.naturalearthdata.com/>
- Ober, J. A. (2008). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 128–129.
- Odegard, I. Y. R., & van der Voet, E. (2014). The future of food - Scenarios and the effect on natural resource use in agriculture in 2050. *Ecological Economics*, 97, 51–59. <http://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.10.005>
- ORF. (2015). Gift im Meer und vertrocknende Oasen. Abgerufen 9. Juli 2015, von <http://orf.at/stories/2258125/2258126/>

- Othman, I., & Al-Masri, M. S. (2007). Impact of phosphate industry on the environment: A case study. *Applied Radiation and Isotopes*, 65, 131–141. <http://doi.org/10.1016/j.apradiso.2006.06.014>
- Owen, N. a., Inderwildi, O. R., & King, D. a. (2010). The status of conventional world oil reserves- Hype or cause for concern? *Energy Policy*, 38(8), 4743–4749. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.02.026>
- Papastefanou, C., Stoulos, S., Ioannidou, a., & Manolopoulou, M. (2006). The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact. *Journal of Environmental Radioactivity*, 89, 188–198. <http://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.05.005>
- Peltier, J. (2011). Broken Y Axis in an Excel Chart. Abgerufen 21. Juli 2015, von <http://peltiertech.com/images/2011-11/Ybroken.png>
- Pérez-López, R., Álvarez-Valero, A. M., & Nieto, J. M. (2007). Changes in mobility of toxic elements during the production of phosphoric acid in the fertilizer industry of Huelva (SW Spain) and environmental impact of phosphogypsum wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 148, 745–750. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.068>
- Pimentel, D. (2006). Soil erosion: A food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability*, 8(1), 119–137. <http://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8>
- Ramankutty, N., Evan, A. T., Monfreda, C., & Foley, J. a. (2008). Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(1), 1–19. <http://doi.org/10.1029/2007GB002952>
- Raouf, F. F., Nabizadeh, R., & Jafarzadeh, N. (2005). Identification and classification of industrial solid wastes in ammonia unit of razi petrochemical complex and feasibility of waste minimization. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2(4), 261–266.
- Rauche, H. a M., & Fulda, D. (2001). Tailings and Disposal Brine Reduction – Design Criteria for Potash Production in the 21 st Century. *Tailings and mine waste*, 8591.
- Reijnders, L. (2014). Resources , Conservation and Recycling Phosphorus resources , their depletion and conservation , a review. «*Resources, Conservation & Recycling*», 93, 32–49. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.006>
- Rentería-Villalobos, M., Vioque, I., Mantero, J., & Manjón, G. (2010). Radiological, chemical and morphological characterizations of phosphate rock and phosphogypsum from phosphoric acid factories in SW Spain. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 193–203. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.116>
- Ripley, E. A., Redmann, R. E., & Crowder, A. A. (1996). *Environmental effects of mining*. St. Lucie Press.
- Roberts, T. L. (2008). Global Potassium Reserves and Potassium Fertilizer Use. *October*.
- Saadat, A. (2007). Wikimedia-Webseite: Weltkarte mit Kohlen-Output. Abgerufen 25. Juni 2015, von <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2005coal.png>
- Saskatchewan ECO-Network. (2001). How Is the Water? Perspectives on Water and Rural Communities in Saskatchewan. Abgerufen 31. März 2015, von <http://econet.ca/pdf/Water.pdf>

- Scholz, R. W., & Wellmer, F. W. (2013). Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: What we may learn from the case of phosphorus? *Global Environmental Change*, 23(1), 11–27. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.013>
- Scholz, R. W., & Wellmer, F. W. (2015a). Comment on: «Recent revisions of phosphate rock reserves and resources: a critique» by Edixhoven et al. (2014) – Phosphate reserves and resources: what conceptions and data do stakeholders need for sustainable action? *Earth System Dynamics Discussions*, 6, 31–80. <http://doi.org/10.5194/esdd-6-31-2015>
- Scholz, R. W., & Wellmer, F. W. (2015b). Comment on: «Recent revisions of phosphate rock reserves and resources: a critique» by Edixhoven et al. (2014) – Phosphate reserves and resources: what conceptions and data do stakeholders need for sustainable action? Abgerufen 8. Juni 2015, von <http://www.earth-syst-dynam-discuss.net/6/31/2015/esdd-6-31-2015-discussion.html>
- Schröder, J. J., Cordell, D., Smit, A. L., & Rosemarin, A. (2010). Sustainable use of phosphorus. *Wageningen: Plant ...*, 140.
- Schulz, T. (2014). *Der Statistische Atlas*. Technische Universität Dresden.
- Searls, J. P. (2000). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 128–129.
- Searls, J. P. (2001). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 124–125.
- Searls, J. P. (2002). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 126–127.
- Searls, J. P. (2003). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 128–129.
- Searls, J. P. (2004). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 126–127.
- Searls, J. P. (2005). Potash. *USGS Mineral Commodities Summaries*, 126–127.
- Sebastian, K. (Hrsg.). (2014). *Atlas Of African Agriculture Research & Development*. Washington: International Food Policy Research Institute.
- Shafiee, S., & Topal, E. (2008). When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy*, 37(1), 181–189. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.016>
- Sheldrick, W. F., Syers, J. K., & Lingard, J. (2002). A conceptual model for conducting nutrient audits at national, regional, and global scales. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 62(1), 61–72. <http://doi.org/10.1023/A:1015124930280>
- Smil, V. (2000). Phosphorus in the environment : Natural Flows and Human Interferences, 53–88.
- Smil, V. (2001). *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Stauffer, B. (2014). Der Abfallkübel Marokkos. Abgerufen 31. März 2015, von <http://www.nzz.ch/aktuell/international/reportagen-und-analysen/der-abfallkuebel-marokkos-1.18260836>
- Stout, B. A. (1990). *Handbook of Energy for World Agriculture*.

- Sutton, M. A., Bleeker, A., Howard, C. M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W., ... Zhang, Y. (2013). *Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution*. Edinburgh, UK: Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative.
- Sverdrup, H. U., & Ragnarsdottir, K. V. (2011). Challenging the planetary boundaries II: Assessing the sustainable global population and phosphate supply, using a systems dynamics assessment model. *Applied Geochemistry*, 26, S307–S310. <http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.089>
- Syers, K., Bekunda, M., & Cordell, D. (2011). Phosphorus and food production. *UNEP Year Book*, 34–45.
- Tayibi, H., Choura, M., López, F. a., Alguacil, F. J., & López-Delgado, A. (2009). Environmental impact and management of phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*, 90, 2377–2386. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.03.007>
- UN. (2015a). Countries reach historic agreement to generate financing for new sustainable development agenda. Abgerufen 21. Juli 2015, von <http://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2015/07/countries-adopt-addis-ababa-action-agenda/>
- UN. (2015b). *WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)*. Paris.
- UN: Department of Economic and Social Affairs. (2013). World population prospects: The 2012 revision. *Population Division 2013*.
- USGS. (2014). *Mineral commodity summaries 2014*.
- USGS. (2015a). *Mineral Commodity Summaries 2015*.
- USGS. (2015b). USGS-Webseite. Abgerufen 24. Juni 2015, von <http://www.usgs.gov/aboutusgs/>
- Vaccari, D. A., Mew, M., Scholz, R. W., & Wellmer, F. W. (2014). Exploration: What Reserves and Resources? In *Sustainable Phosphorus Management* (S. 129–151). Dordrecht: Springer Science+Business Media. <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7250-2>
- Vaccari, D. A., & Strigul, N. (2011). Extrapolating phosphorus production to estimate resource reserves. *Chemosphere*, 84(6), 792–797. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.052>
- Vance, C. P. (2001). Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant physiology*, 127(2), 390–397. <http://doi.org/10.1104/pp.010331>
- Vonhof, J. A. (1975). Waste disposal problems near potash mines in Saskatchewan , Canada, (103), 191–215.
- Walan, P., Davidsson, S., Johansson, S., & Höök, M. (2014). Resources , Conservation and Recycling Phosphate rock production and depletion : Regional disaggregated modeling and global implications. «*Resources, Conservation & Recycling*», 93, 178–187. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.10.011>

- Wali, A., Colinet, G., Khadhraoui, M., & Ksibi, M. (2013). Trace Metals in Surface Soil Contaminated by Release of Phosphate Industry in the Surroundings of Sfax-Tunisia. *Environmental Research, Engineering and Management*, 65(3), 20–30.
- Ward, J. (2008). Peak phosphorus: Quoted reserves vs. production history. Abgerufen von <http://www.resilience.org/stories/2008-08-26/peak-phosphorus-quoted-reserves-vs-production-history#>
- Ware, C. (2013). *Information Visualisation - Perception for Design* (3. Aufl.). Waltham, USA: Morgan Kaufmann.
- Wikipedia.de. (2015a). Abraum (Bergbau). Abgerufen 24. Juni 2015, von [https://de.wikipedia.org/wiki/Abraum\\_%28Bergbau%29](https://de.wikipedia.org/wiki/Abraum_%28Bergbau%29)
- Wikipedia.de. (2015b). Apatit. Abgerufen 24. Juni 2015, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Apatit>
- Wikipedia.de. (2015c). Dünger. Abgerufen 29. Juni 2015, von [https://de.wikipedia.org/wiki/D%C3%BCnger#Organischer\\_D.C3.BCnger](https://de.wikipedia.org/wiki/D%C3%BCnger#Organischer_D.C3.BCnger)
- Wikipedia.de. (2015d). Erz. Abgerufen 24. Juni 2015, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Erz>
- Wikipedia.de. (2015e). Grundwasserleiter. Abgerufen 24. Juni 2015, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Grundwasserleiter>
- Wikipedia.de. (2015f). Naphtha. Abgerufen 24. Juni 2015, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Naphtha>
- Wikipedia.de. (2015g). Nuklid. Abgerufen 24. Juni 2015, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Nuklid>
- Wikipedia.de. (2015h). Radionuklid. Abgerufen 24. Juni 2015, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Radionuklid>
- Wikipedia.de. (2015i). Tagebau. Abgerufen 24. Juni 2015, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Tagebau>
- Williams-Stroud, S. C., Searls, J. P., & Hite, R. J. (1994). Potash Resources. In *Industrial minerals and rocks* (S. 783–802). Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- World Commission on Environment and Development. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future (The Brundtland Report). *Medicine, Conflict and Survival*, 4(1), 300. <http://doi.org/10.1080/07488008808408783>
- ZAMG. (2015). Lithosphäre - Gesteinshülle der Erde. Abgerufen 24. Juni 2015, von <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimasystem/geosphaeren/lithosphaere>
- Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2013). Potassium in agriculture - Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 656–669. <http://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>



## Verzeichnis der Bilder

Abbildung 1: Luftfotografie der Insel Nauru: 80% der Insel gleicht einer Mondlandschaft (Lister, 2012) .....	9
Abbildung 2: Formeln für die Berechnung der P- und K-Reserven in der Zukunft .....	14
Abbildung 3: Entwicklung der Phosphor-Reserven-Schätzung der Jahre 2000 bis 2015 (Jasinski, 2000, 2001, 2010a, 2011a, 2012a, 2013a, 2014a, 2015a, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009a) .....	22
Abbildung 4: Hubbert-Kurve für Phosphor (Cordell et al., 2009) .....	24
Abbildung 5: Diagramm der Entwicklung der Kalium-Reserven-Schätzung (Jasinski, 2009b, 2010b, 2011b, 2012b, 2013b, 2014b, 2015b; Kostick, 2006, 2007; Ober, 2008; Searls, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005) .....	27
Abbildung 6: Diagramm der weltweiten Kalium-Produktionsmenge zwischen 2000 und 2014 (Zahlen für 2014 geschätzt) (Jasinski, 2009b, 2010b, 2011b, 2012b, 2013b, 2014b, 2015b; Kostick, 2006, 2007; Ober, 2008; Searls, 2002, 2003, 2004, 2005) .....	30
Abbildung 7: Phosphor-Mine in Togo (Butusov & Jernelöv, 2013) .....	32
Abbildung 8: Chemische Formel für die Herstellung von Phosphorsäure aus Phosphorgestein (Lottermoser, 2010) .....	33
Abbildung 9: Phosphor-Gips-Hügel in Russland (Butusov & Jernelöv, 2013) .....	33
Abbildung 10: Diagramm: Menge an Abfallerz und Salzlake im Verhältnis zur geförderten Pottasche (Strathdee, 1994, zitiert nach Ripley et al., 1996) .....	36
Abbildung 11: Karte mit konventionellen bestätigten oder möglichen Erdöl-Reserven in Weiss und dem schon verbrauchten Teil davon schraffiert (Harper, 1999, zitiert nach Bentley, 2002) .....	39
Abbildung 12: Weltkarte mit den Goldlagerstätten, deren Grösse, ihrem Alter und dem Gestein, in dem sie vorkommen (Goldfard et al., 2005) .....	40
Abbildung 13: Karte vom afrikanischen Kontinent mit der Verbreitung einiger natürlicher Rohstoffe (Möckli, 2008) .....	41
Abbildung 14: Weltkarte mit Kohleproduktion (Saadat, 2007) .....	42
Abbildung 15: Weltkarte mit den erneuerbaren Wasserressourcen pro Kopf (UN, 2015b) .....	43

---

Abbildung 16: Karte zum Thema Phosphor-Düngerherstellung und Reserven und zum Länderrisiko (BGR, 2014) .....	44
Abbildung 17: Karte mit den Ländern mit den grössten Phosphor-Bergwerken, Explorations- und Bergbauprojekten (BGR, 2014).....	45
Abbildung 18: Welt-Karte mit den Ländern mit den grössten Phosphat-Reserven und der grössten Schwefelsäure-Produktion (Schröder et al., 2010).....	46
Abbildung 19: Welt-Karte mit ökonomisch und potentiell ökonomisch ausbeutbaren Phosphat-Vorkommen (Fixen & Johnston, 2012).....	47
Abbildung 20: Karte zum Thema Überschuss und Defizit von Phosphor (MacDonald et al., 2011).....	47
Abbildung 21: Welt-Karte zum Thema der grössten Düngemittel-Hersteller (Bartz et al., 2015) ....	48
Abbildung 22: Weltkarte mit den Phosphor- und Kalium-Reserven im Jahr 2014 .....	51
Abbildung 23: Karte mit den weltweiten Phosphor- und Kalium-Reserven im Jahr 2014 .....	52
Abbildung 24: Weltweite Phosphor-Reserven im Jahr 2014 und -Produktion im Jahr 2013.....	53
Abbildung 25: Weltkarte der Phosphor-Reserven im Jahr 2014 sowie 100 Jahre später .....	54
Abbildung 26: Weltkarte mit Phosphor-Reserven aus dem Jahr 2014 und -Produktion im Jahr 2013 und bestätigten Umweltbelastungen beim Abbau .....	55
Abbildung 27: Vier Karten mit der Entwicklung der weltweiten Phosphor-Reserven in den nächsten 80 Jahren .....	56
Abbildung 28: Weltkarte mit Kalium-Reserven aus dem Jahr 2014 und -Produktion im Jahr 2013 und bestätigten Umweltbelastungen beim Abbau .....	57
Abbildung 29: Vier Karten mit der Entwicklung der weltweiten Kalium-Reserven in den nächsten 80 Jahren .....	58
Abbildung 30: "gebrochener" Balken in einer Excel-Statistik (Peltier, 2011).....	67
Abbildung 31: Zusammenfassung der Risiken und Auswirkungen der N, P, und K-Düngerherstellung und ihre Problematik.....	72

---

## Tabellen-Verzeichnis

Tabelle 1: Grunddaten der erstellten Karten .....	11
Tabelle 2: Grunddaten für die Karten-Erstellung .....	12
Tabelle 3: GIS-Visualisierung der Daten der Haupt-Karten .....	12
Tabelle 4: Reserven-Klassen für die Karten-Darstellung .....	12
Tabelle 5: Geolokalisierte Umweltschäden bei Phosphordünger-Produktionsstätten .....	13
Tabelle 6: Geolokalisierte Umweltschäden bei Kaliumdünger-Produktionsstätten .....	13
Tabelle 7: GIS-Visualisierung der Daten der „small multiples“-Karten .....	13
Tabelle 8: Die Elemente N, P und K und ihre Funktionen in Pflanzen (Benton, 2012) .....	15
Tabelle 9: Chemische Verbindungen von N, P und K zwischen Ausgangsmaterial und Pflanzenaufnahme .....	16
Tabelle 10: Reichweiten-Schätzungen verschiedener Autorinnen und Autoren zu den weltweiten Erdgas-, Erdöl- und Kohle-Reserven .....	21
Tabelle 11: Länder mit grosser Veränderung der geschätzten Phosphor-Reserven zwischen 2010 und 2011 (Jasinski, 2010a, 2011a) .....	22
Tabelle 12: Hauptunterschiede der vier IPCC-Szenarien und ihre Phosphor-Reichweiten (Odegard & van der Voet, 2014) .....	24
Tabelle 13: Wissenschaftliche Artikel, die sich auf USGS-Daten vor dem Jahr 2011 beziehen, die angewandte Methode zur Berechnung der Reserven-Reichweite und ihre Ergebnisse .....	25
Tabelle 14: Wissenschaftliche Artikel, die sich auf USGS-Daten ab dem Jahr 2011 beziehen, die angewandte Methode zur Berechnung der Reserven-Reichweite und ihre Ergebnisse .....	26
Tabelle 15: Länder mit den grössten Veränderungen der K <sub>2</sub> O-Reserven-Schätzungen zwischen 2013 und 2015 (Jasinski, 2013b, 2015b) .....	28
Tabelle 16: Zusammenfassung verschiedener Schätzungen der Kalium-Reserven-Reichweite ....	29
Tabelle 17: Hauptunterschiede der vier IPCC-Szenarien und ihre Kalium-Reichweite (Odegard & van der Voet, 2014). Die verschiedenen Szenarien sind in Tabelle 12 genauer beschrieben .....	30
Tabelle 18: Befürchtete oder reale Umweltverschmutzungen durch Phosphor-Minen und -Fabriken .....	35

Tabelle 19: Befürchtete oder reale Umweltverschmutzungen durch Kalium-Minen und -Fabriken	37
Tabelle 20: Energieaufwand und Quelle für die Herstellung von NPK-Düngern .....	38
Tabelle 21: Zusammenstellung der untersuchten Karten, Beschreibung der gewählten Darstellungsform und Kritik .....	49
Tabelle 22: Berechnung der $K_2O$ -Reichweite mit Reserven gemäss USGS-Report 2015 und jährlich 3% Zuwachs der Produktionsmenge .....	5

---

## Anhang 1 – Berechnung der K<sub>2</sub>O-Reichweite

**Tabelle 22: Berechnung der K<sub>2</sub>O-Reichweite mit Reserven gemäss USGS-Report 2015 und jährlich 3% Zuwachs der Produktionsmenge**

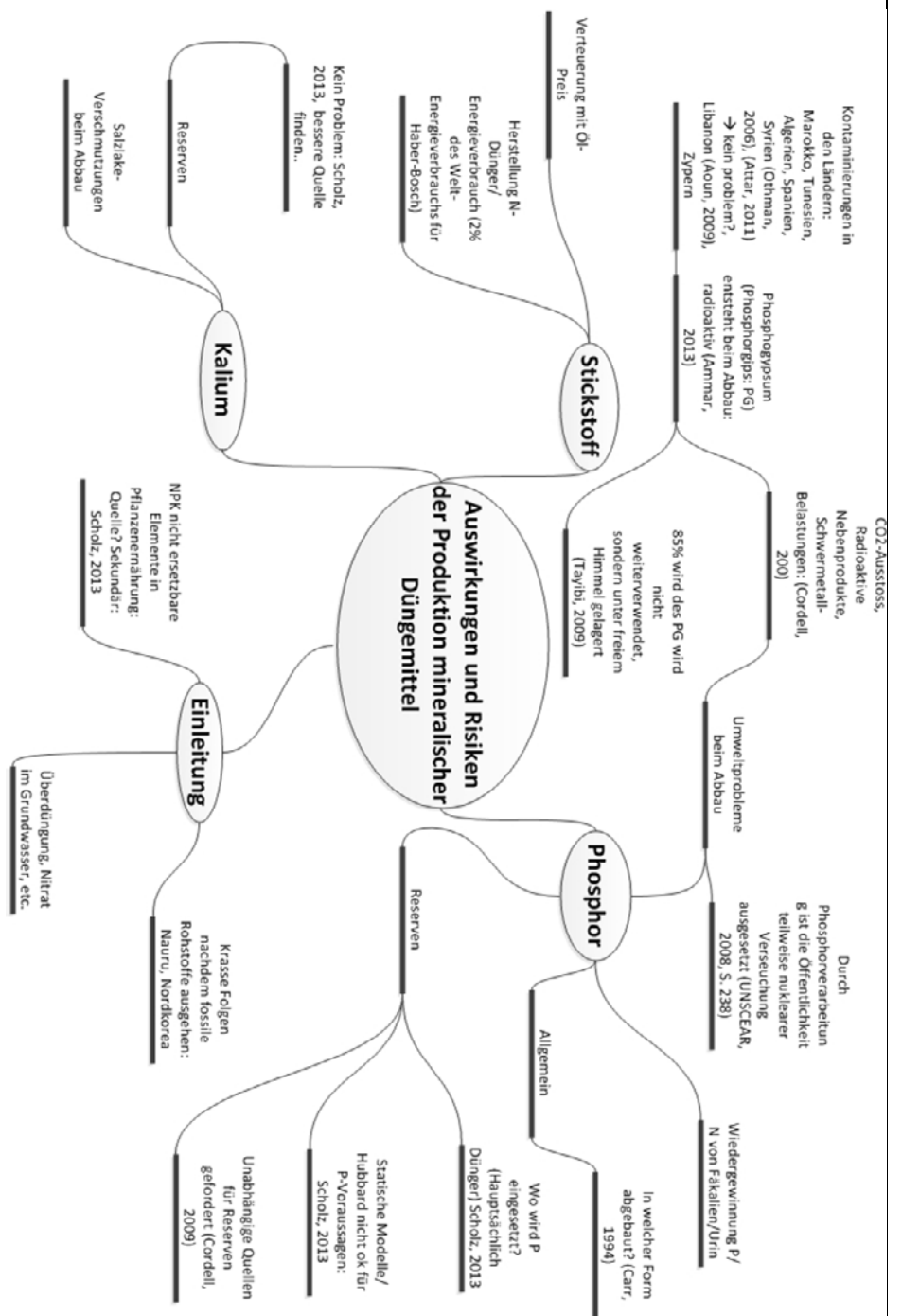
Jahr	Reserven	Verbrauch (jeweils 3% mehr pro Jahr)	
2015	3'500'000	34'500	
2016	3'465'500	35'535	
2017	3'429'965	36'601	
2018	3'393'364	37'699	
2019	3'355'665	38'830	
2020	3'316'835	39'995	
2021	3'276'840	41'195	
2022	3'235'645	42'431	
2023	3'193'214	43'704	
2024	3'149'511	45'015	
2025	3'104'496	46'365	
2026	3'058'131	47'756	
2027	3'010'375	49'189	
2028	2'961'186	50'664	
2029	2'910'522	52'184	
2030	2'858'337	53'750	
2031	2'804'588	55'362	
2032	2'749'225	57'023	
2033	2'692'202	58'734	
2034	2'633'468	60'496	
2035	2'572'972	62'311	
2036	2'510'661	64'180	
2037	2'446'481	66'106	
2038	2'380'376	68'089	
2039	2'312'287	70'131	
2040	2'242'155	72'235	
2041	2'169'920	74'402	
2042	2'095'518	76'634	
2043	2'018'883	78'934	
2044	1'939'950	81'302	
2045	1'858'648	83'741	
2046	1'774'908	86'253	
2047	1'688'655	88'840	
2048	1'599'814	91'506	
2049	1'508'309	94'251	
2050	1'414'058	97'078	
2051	1'316'980	99'991	
2052	1'216'989	102'990	
2053	1'113'999	106'080	
2054	1'007'919	109'262	
2055	898'657	112'540	
2056	786'116	115'917	
2057	670'200	119'394	
2058	550'806	122'976	
2059	427'830	126'665	
2060	301'165	130'465	
2061	170'700	134'379	
2062	36'321	138'410	<b>Jahre seit 2015: 47</b>
2063	<b>-102'090</b>	142'563	

## Anhang 2 - Aufgabenstellung

Bachelor-Arbeit		
Studienjahrgang		UI 10
Titel		<b>Auswirkungen und Risiken der Produktion mineralischer Dünger: eine kartographische Auseinandersetzung</b>
Vertraulich		ja <input type="checkbox"/> X nein <input checked="" type="checkbox"/>
Fachgebiet		Geography of Food
Namen	StudentIn	<b>Ennio Mariani</b>
	1. KorrektorIn	Isabel Jaisli
	2. KorrektorIn	Sabine Stauffacher
	3. KorrektorIn	

<b>Aufgabenstellung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Ausgangslage</b></li> <li>• <b>Zielsetzungen</b></li> <li>• <b>Zusätzliche Auftragsmodalitäten</b></li> </ul>	<b>Ausgangslage</b> <p>Das Buchprojekt „Foodatlas - ein Buchprojekt zur Schweizer Lebensmittelgeographie“ der Forschungsgruppen "Geography of Food" und "Geoinformatik" der ZHAW Wädenswil soll Fragen rund um das Thema Nahrungsmittel und Landwirtschaft sowie ihre Umweltauswirkungen behandeln.</p> <p>In der Diskussion über verschiedene Landwirtschaftsformen ist unter anderem die Herkunft und Verwendung der Düngemittel zentral. Die Produktion mineralischer Dünger ist mit teilweise problematischen Auswirkungen für die Umwelt verbunden. Längerfristig wird die Erschöpfung der Kali- und Phosphorminen und der grosse Energieeinsatz bei der Herstellung von Stickstoffdüngern zu einer grossen Herausforderung werden.</p> <b>Zielsetzung</b> <p>Im Rahmen der Bachelorarbeit soll eine räumliche Analyse der Auswirkungen und Risiken der Produktion der Hauptnährelemente (NPK) mineralischer Dünger erstellt werden.</p> <p>Der Fokus der Arbeit soll darauf liegen, wie wissenschaftliche Ergebnisse kartographisch dargestellt werden können („Science mapping“). Aufgrund einer Literaturrecherche und der Analyse statistischer Daten sollen Erkenntnisse zum Abbau von Kalium und Phosphor und der Herstellung von Stickstoff-Düngern gewonnen werden.</p> <p>Beim Abbau der Kalium- und Phosphoreserven soll die Endlichkeit der Ressourcen, bei der energieintensiven Bindung von Luft-Stickstoff die Abhängigkeit zum vermutlich zunehmenden Erdölpreis untersucht werden. Neben den genannten Risiken, die vor allem die langfristige Verfügbarkeit dieser Düngemittel in Frage stellen, sollen auch direkte Umweltbelastungen recherchiert und in einen räumlichen Kontext gebracht werden. Beim Phosphor-Abbau fällt zum Beispiel in verschiedenen Ländern der oft radioaktiv belastete Phosphorgips an, welcher gemäss gewissen Studien oft unsachgemäss gelagert wird und darum durch Erosion in die Umwelt gelangt.</p> <p>Die gewonnen Erkenntnisse sollen anschliessend mit Hilfe des Programms ArcGIS von ESRI in GIS-Karten visualisiert werden. Dabei soll auch eine Literaturrecherche bezüglich den Techniken und Möglichkeiten der Darstellung wissenschaftlicher Inhalte auf Karten durchgeführt werden.</p> <b>Zusätzliche Auftragsmodalitäten</b> <p><u>Erwartete Resultate</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bachelorarbeit, gemäss Weisungen ZHAW</li> <li>- Spezieller Inhalt der Bachelorarbeit: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Literaturrecherche zu den verschiedenen Düngemitteln</li> <li>○ Sammlung und Auswertung statistischer Daten</li> <li>○ Literaturrecherche zum Thema Kartographie</li> <li>○ Erstellung von GIS-Karten</li> </ul> </li> </ul>
---	---

## Mind Map

Formale  
gen

Anforderungen

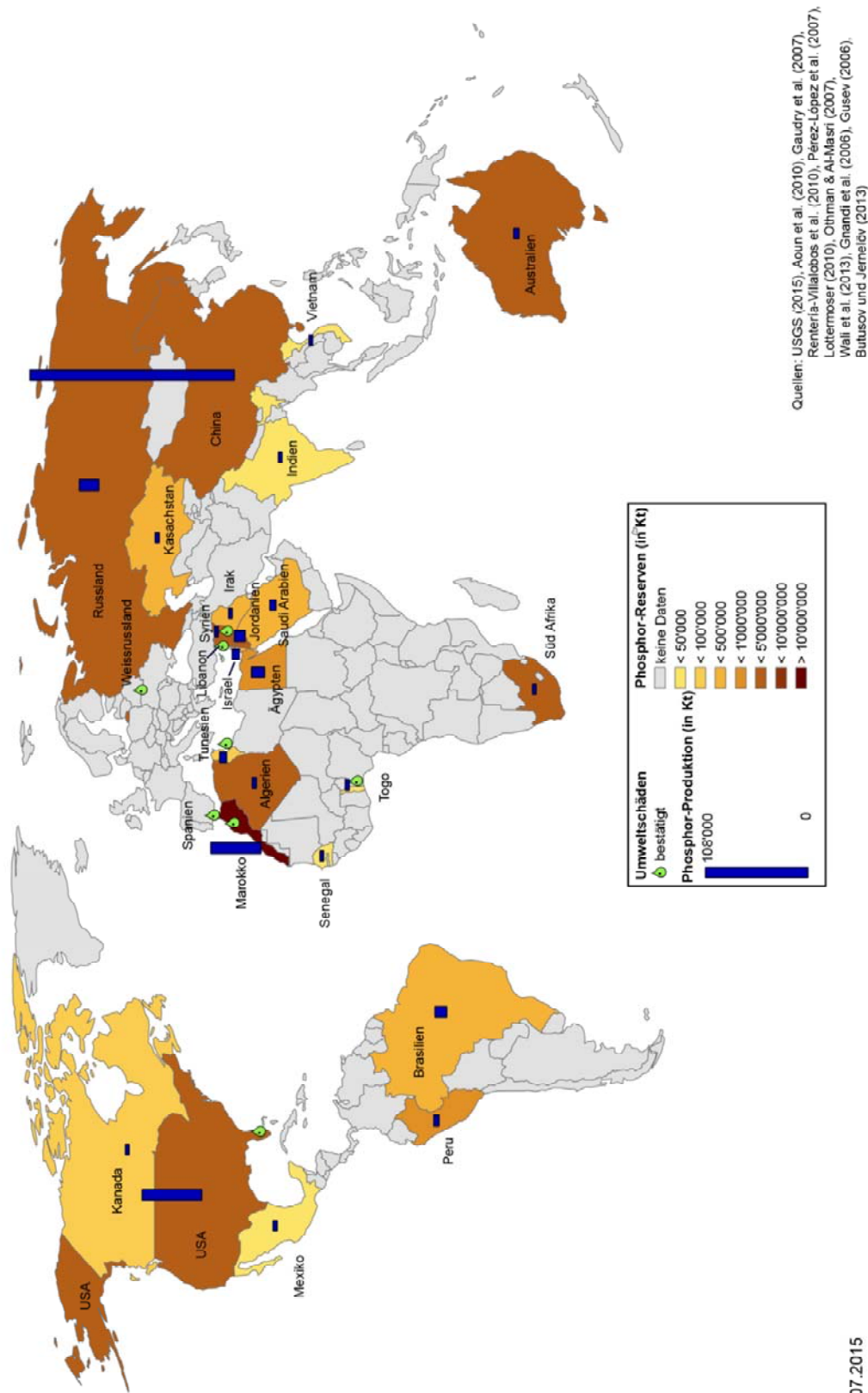
Die Weisungen zur Arbeit müssen gelesen und erfüllt werden.  
<http://www.lsfm.zhaw.ch/science/studium/info/bachelor-studium/wichtige-dokumente.html>

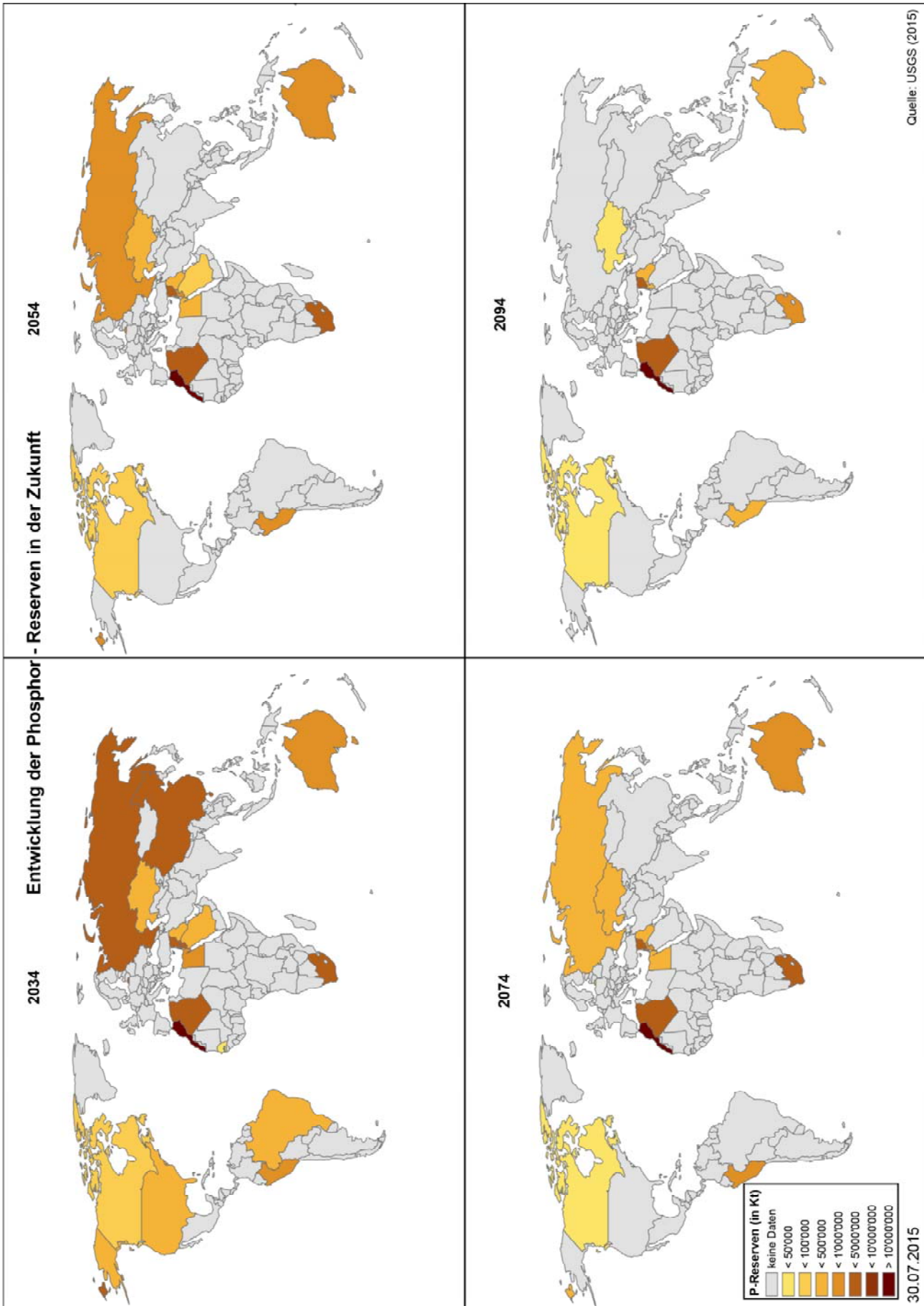


Für Bachelorstudienjahrgänge mit Studienbeginn ab 2010 und die Masterstudiengänge mit Studienbeginn ab 2009 gilt § 39 der Rahmenprüfungsordnung für Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29.01.2008.

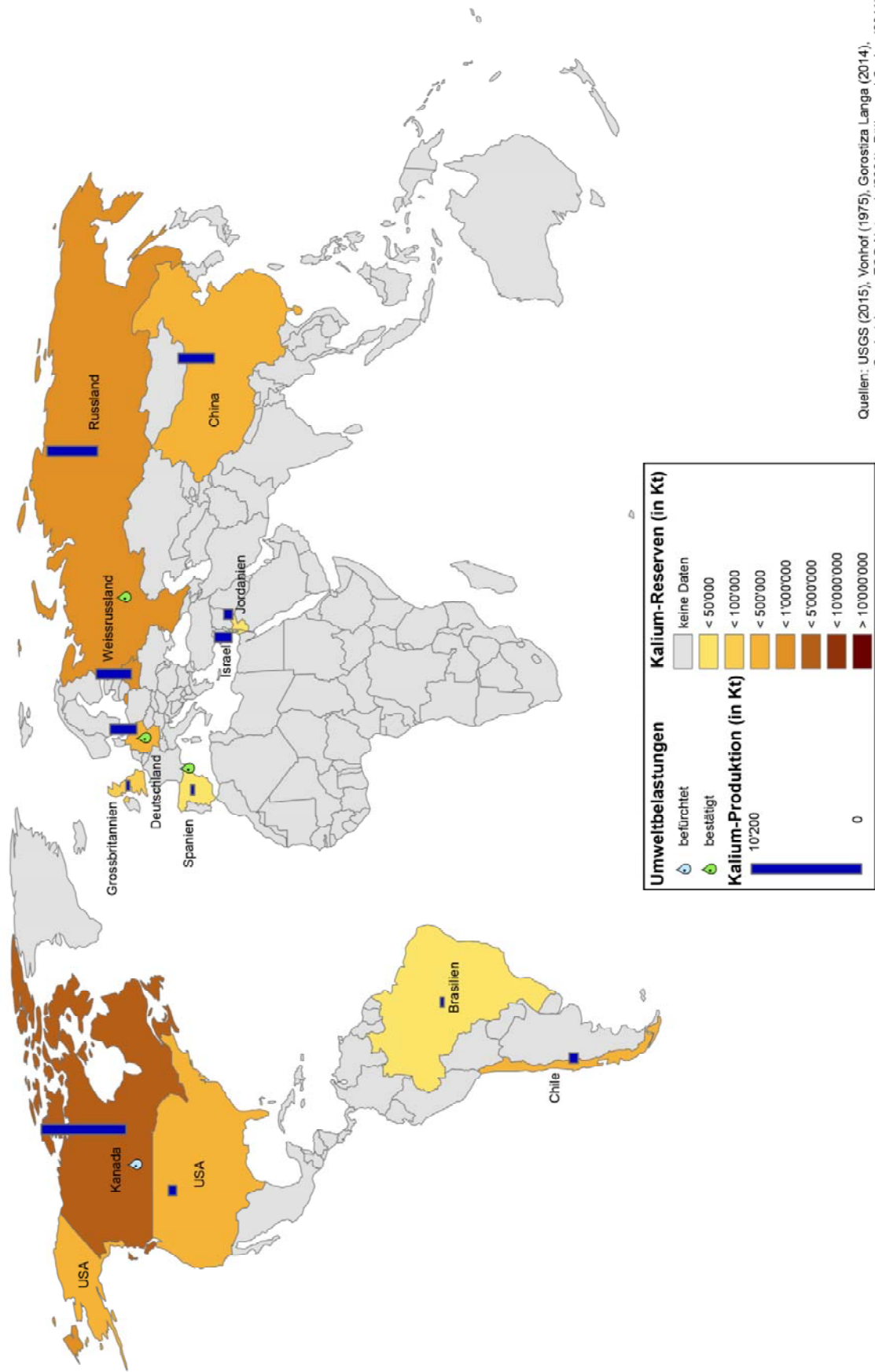
Anhang 3 – definitive Karten

Phosphor-Reserven im Jahr 2014 und -Produktion im Jahr 2013

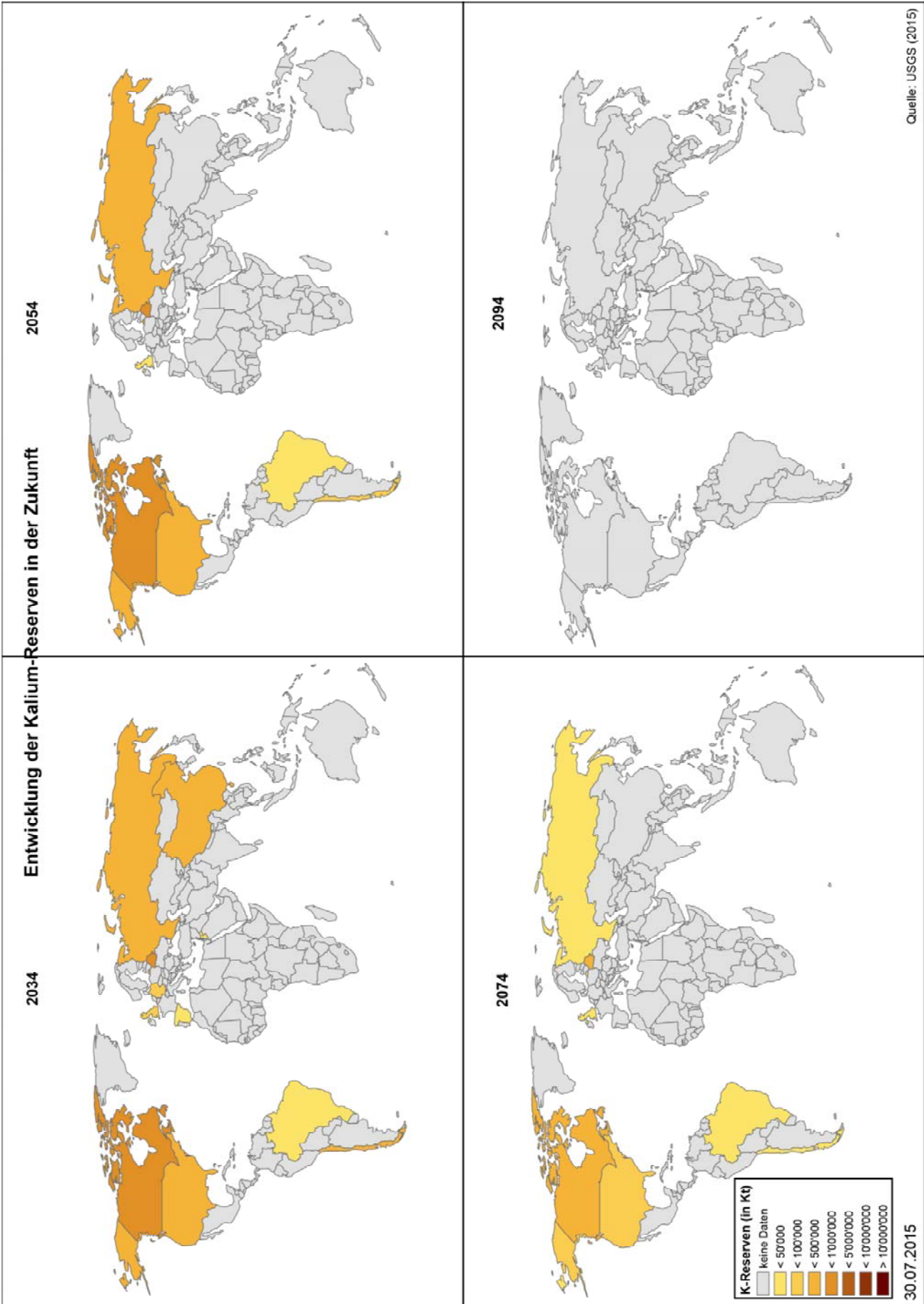




Kalium-Reserven im Jahr 2014 und -Produktion im Jahr 2013



Quellen: USGS (2015), Vorhof (1975), Gorostiza Langa (2014),  
Saskatchewan ECO-Network (2001), Bathe und Coring (2011),  
Lepikhin et al. (2012), Braukmann und Bohme (2011)



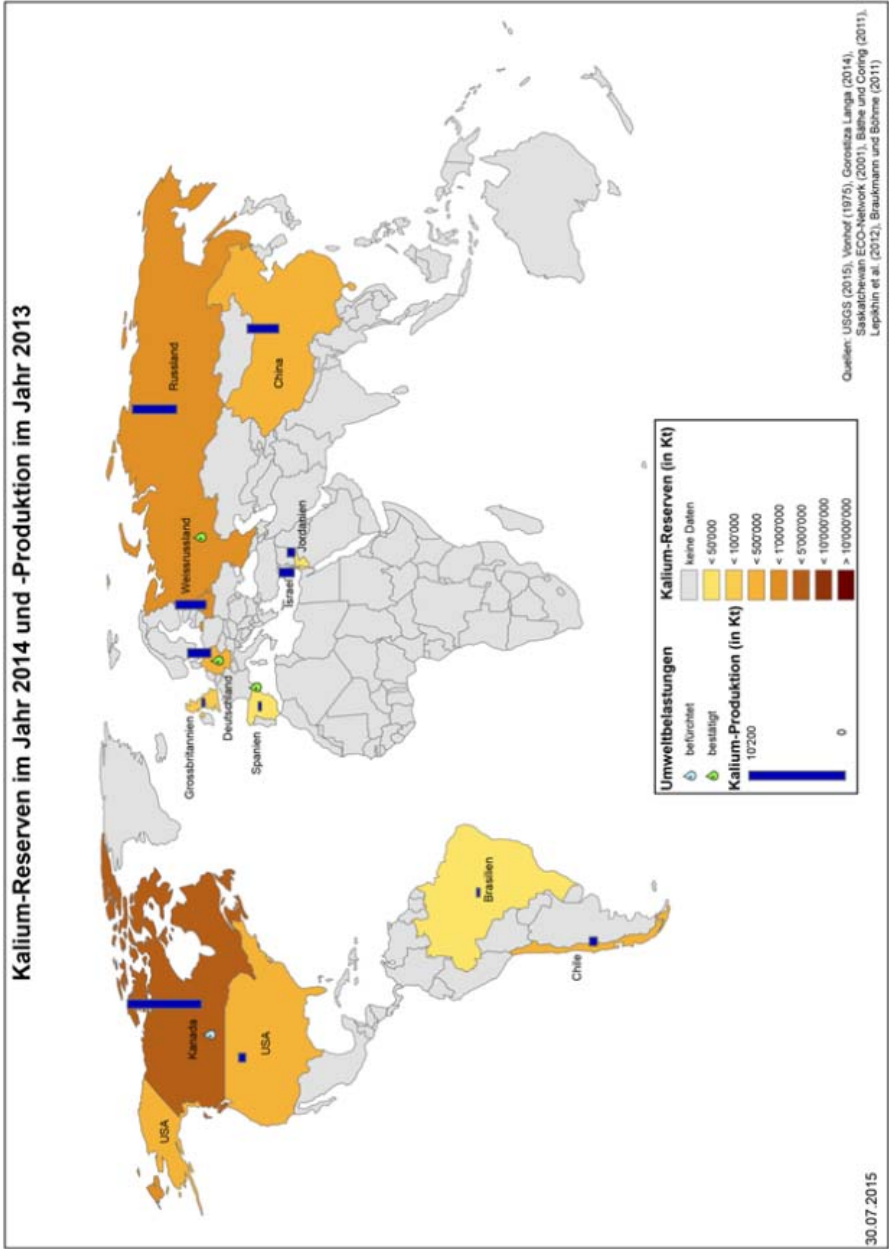


# Anhang 4 – Beitrag zum FoodAtlas

## Fertig fertil? Risiken und Auswirkungen der Kaliumdünger-Produktion

Die heutige Landwirtschaft ist stark von mineralischen Düngern abhängig. Kalium ist eines der wichtigsten Pflanzennährelemente und wird in Minen gefördert. Dabei werden auch Umweltschäden verursacht. Die zentrale Frage ist jedoch, wie lange die Reserven im Boden noch reichen, um den steigenden Bedarf an Kaliumdüngern zu decken.

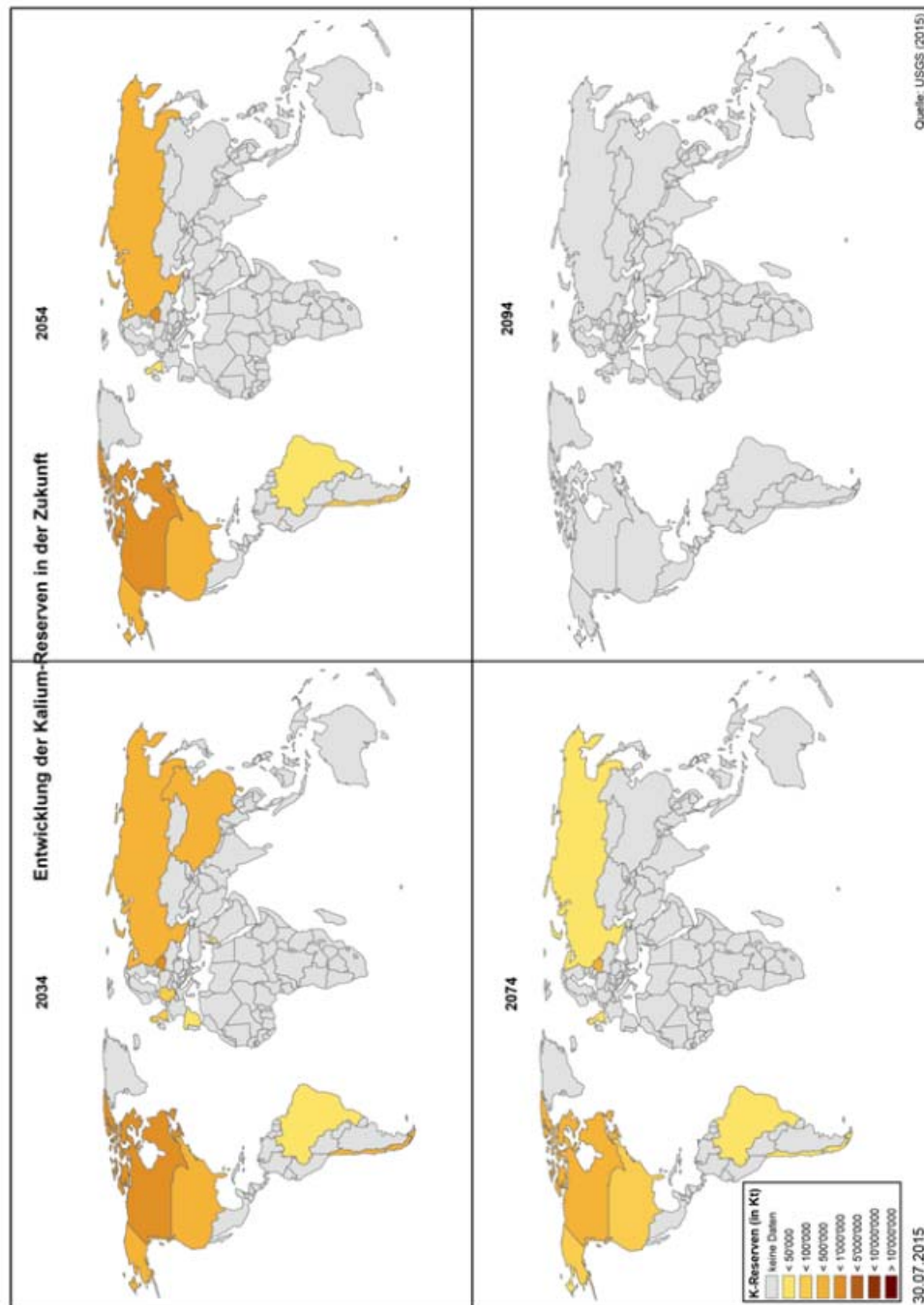
Kalium-Reserven im Jahr 2014 und -Produktion im Jahr 2013



Es wird geschätzt, dass mit mineralischen Düngern ungefähr die Hälfte der Nahrungsmittel der Weltbevölkerung produziert wird. Kalium nimmt dabei als eines der wichtigsten Pflanzennährelemente eine zentrale Rolle ein.

Kalium wird heute hauptsächlich in Kanada, Russland, Deutschland, China und Weissrussland in Minen abgebaut. Dabei entstehen grosse Mengen an stark salzhaltigen Abfällen, durch deren unsachgemässe Entsorgung teilweise grosse Umweltweltschäden verursacht werden.

In der biologischen Landwirtschaft sind mineralische Dünger nicht erlaubt. Aus diesem Grund wird dort hauptsächlich mit Gülle und Mist der Kalium-Bedarf der Pflanzen gedeckt. Alternativ kann Kalium auch aus menschlichen Fäkalien zurückgewonnen werden, was längerfristig ungünstig sein wird.



Für die zukünftige Lebensmittelversorgung ist die Reichweite der geschätzten Kalium-Reserven besonders wichtig.

In den Karten auf dieser Seite wird eine mögliche Entwicklung der weltweiten Reserven aufgezeigt. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die weltweite Produktion jährlich um 1% erhöht.

Nach dieser Berechnung gibt es im Jahr 2094 keine Kalium-Reserven mehr. Der Begriff Reserven beschreibt aber nur die Menge an Kalium-Erz, welche mit heutiger Technologie ökonomisch verwertbar abgebaut werden kann. Es wird also im Jahr 2094 noch Kalium-Vorkommen geben, allerdings werden diese sehr wahrscheinlich nur unter massiv höherem, geldintensiverem Aufwand abgebaut werden können. Dies wird den Preis in die Höhe treiben, was vor allem ärmeren Bauern die Verwendung von Kalium-Düngern verunmöglichen wird.

## **Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management**

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinar massnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Unterschrift:

.....

.....

Das Original dieses Formulars ist bei der ZHAW-Version aller abgegebenen Bachelorarbeiten im Anhang mit Original-Unterschriften und -Datum (keine Kopie) einzufügen.